

АТОМ



№ 94²⁰²²

ИФВ – 70 ЛЕТ





В НОМЕРЕ:

К ЮБИЛЕЮ ИФВ

- | | | |
|----|--|--|
| 2 | А. Л. Михайлов | «Звездный ансамбль» |
| 5 | Д. В. Мильченко,
А. Л. Михайлов | Начальное звено. Химические ВВ
в ядерных зарядах |
| 11 | А. В. Федоров | Физика детонации и лазерная
интерферометрия |
| 15 | Е. Н. Богданов | Микроволновая диагностика
быстропротекающих процессов |
| 20 | И. В. Занегин,
А. Л. Михайлов,
И. В. Шиберин | Экзотические ударные волны разрежения
и их применение |
| 24 | Е. В. Ботов,
В. Н. Хворостин | Взрывные генераторы давления для
горнодобывающей промышленности |
| 27 | Э. Э. Лин | Асимптотическая кинетика образования
объектов, проявляющих квантовые свойства |
| 31 | З. В. Танаков,
Э. Э. Лин | Эффекты множественного соударения |
| 35 | М. А. Власова,
Ан. А. Демидов | «И как стела вершина возносит ввысь
имя русского академика...» |
| 41 | М. В. Жерноклетов,
А. М. Подурец | Один из старейших отделов. К 75-летию
четвертого отдела газодинамик |
| 48 | | Кирилл Щёлкин: ученый, гражданин, солдат |

На 1 стр. обложки: к статье М. А. Власовой, Ан. А. Демидова.
Полигоны ради мира. Памятный знак в пос. Северный, Новая Земля.

На 2 стр. обложки: к статье А. Л. Михайлова.
Открытие памятных стел в ИФВ.

На 4 стр. обложки: к статье И. В. Занегина и др.
Кацусика Хокусай «Большая волна в Канагаве» из цикла «36 видов Фудзи»
и профили ударно-волновых течений.

Адрес редакции: 607188, г. Саров Нижегородской обл., пр. Мира, д. 37,
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Телефон: (831-30)775-85.
E-mail: volkova@vniief.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ – ФГУП
«РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР – ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

ЗАРЕГИСТРИРОВАН
ГОСУДАРСТВЕННЫМ КОМИТЕТОМ РФ
ПО ПЕЧАТИ
№ 12751 от 20.07.94 г.
Издается с декабря 1994 г.

Главный редактор

В. А. Разуваев (главный научный
сотрудник ИТМФ, доктор физ.-мат. наук);
Н. А. Волкова (зам. гл. редактора);
А. К. Музыря (зам. гл. редактора,
доктор техн. наук ВНИИТФ)

Редакционная коллегия

В. Е. Аблесимов (ведущий научный
сотрудник ИЛФИ, канд. физ.-мат. наук);
Ю. А. Астайкина (старший научный
сотрудник КБ-3);
И. Л. Жильцова (старший научный
сотрудник КБ-3);
Г. А. Карташов (советник при дирекции
РФЯЦ-ВНИИЭФ, профессор);
В. И. Лукьянов (главный специалист
СДС РФЯЦ-ВНИИЭФ);
В. Л. Львов (старший научный
сотрудник ИТМФ);
А. Е. Малеев (художник-инженер ИЯРФ);
А. О. Наумов (старший научный
сотрудник ИТМФ);
Л. Н. Пляшкевич (ведущий научный
сотрудник НПЦФ, канд. техн. наук);
А. А. Косогоров (начальник отдела
ИЯРФ);
А. В. Чувиковский (начальник ИПЦ
РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Редактор

Н. П. Гомонова

Компьютерная подготовка оригинала-макета

М. С. Мещерякова

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2022
© Авторы публикаций, 2022

Отпечатано
в Издательско-полиграфическом цехе
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
2022 г.

Свободная цена

Подписано в печать
04.05.2022 г.
Формат 84×108/16
Печать офсетная
Усл. печ. л. ~ 6,0
Уч.-изд. л. ~ 5,5
Тираж 1000 экз.
Заказ 1237-2022



«Звездный ансамбль»

А. Л. МИХАЙЛОВ

7 декабря 2021 г., в один из дней празднования 75-летия РФЯЦ-ВНИИЭФ, перед главным зданием Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва (ИФВ) был открыт ансамбль из шести стел с именами выдающихся ученых-газодинамиков, внесших определяющий вклад в становление и развитие ядерно-оружейной отрасли нашей страны. Вот эти имена.



Юлий Борисович Харитон. Его имя в комментариях не нуждается. Один из основателей и бессменный (в течение почти полувека) научный руководитель КБ-11 – ВНИИЭФ. Его должность главного конструктора в первые годы функционирования КБ-11 не должна вводить в заблуждение – должности научного руководителя

тогда просто не было в штатном расписании. Академик, трижды Герой Социалистического Труда, лауреат трех Сталинских (Государственных) и Ленинской премий, кавалер множества государственных наград. (Их перечисление, как и перечисление многих наград остальных персон опустим. Интересующийся читатель может найти их, например, в биографической энциклопедии «Атомное оружие России», Москва, издательский дом «Столичная энциклопедия», 2012 г.).

Его именем названа улица в Сарове.

В здании, возле которого поставлена стела, прошло без малого четверть века его самой активной деятельности, начиная с разработки первого бинарного термоядерного изделия РДС-37.

Евгений Аркадьевич Негин. Герой Социалистического Труда, академик, генерал-лейтенант авиации, лауреат Ленинской, Сталинской и Государственной премий, директор ВНИИЭФ (1978–1987 гг.). С 1955 по 1959 г. – зам. главного конструктора и научного руководителя, с 1959 по 1991 г. – главный конструктор и первый заместитель научного руководителя ВНИИЭФ. В 1978–1987 гг. совмещал эти две должности



с должностью директора ВНИИЭФ.

В 1952–1955 гг. был третьим по счету начальником отдела 25 сектора 3 (ныне ИФВ) – отдела натурной газодинамической отработки и полигонных испытаний изделий, унаследовав эту должность и прочие перечисленные выше должности от первого заместителя Ю. Б. Харитона – Кирилла Ивановича Щёлкина.

В этом здании Е. А. Негин, как и Ю. Б. Харитон, проработал те же четверть века. Его именем также названа улица в Сарове.



Василий Константинович Боболев. Герой Социалистического Труда, лауреат двух Сталинских премий. Ближайший сотрудник Ю. Б. Харитона еще в 1930-е гг., в период работы обоих в ИХФ АН СССР. Один из первых сотрудников лаборатории № 5 (отдела 25) К. И. Щёлкина. Основатель и первый начальник

сектора 3 (1952–1955 гг.). Первый начальник отдела 25/2 – 26 (1950–1952 гг.). С 1955 по 1960 г. – зам. начальника Главного управления опытных конструкций (ГУОК) Минсредмаша СССР, после – заместитель директора ИХФ АН СССР (зам. Н. Н. Семенова), начальник лаборатории чувствительности взрывчатых веществ к механическим воздействиям.

Леонид Михайлович Тимонин – также выходец из отдела 25 (работал с 1950 г.). Лауреат Сталинской, Ленинской и двух Государственных премий СССР и РФ, заслуженный деятель науки РФ. Начальник сектора 3 – отделения 03 с 1967 по 1998 г. – более 30 лет! Именно в годы его руководства сектор 3 приобрел современные



очертания, что и позволило преобразовать его в ИФВ. При нем из сектора 3 по мере расширения тематики выделились нынешние ИЛФИ, отделения 19 и 38 ВНИИЭФ. По нашему мнению, это был идеальный руководитель научного коллектива: предельно корректный и тактичный в общении, он не солировал, он

дирижировал оркестром выдающихся солистов, где каждый начальник отдела и ряд начальников лабораторий – имя в отрасли или даже в мировой науке.



Александр Дмитриевич Захаренков. Герой Социалистического Труда. Лауреат двух Сталинских и Ленинской премий. Почетный гражданин г. Снежинска. Один из первых сотрудников все той же (1946 г.) лаборатории № 5 отдела 25. В 1952–1955 гг. – начальник отдела 26. С 1955 по 1967 г. работал в

НИИ-1011 (ВНИИП – ВНИИТФ) последовательно в должностях начальника газодинамического сектора, главного конструктора ЯБП, главного конструктора ЯЗ. С 1967 по 1988 г. – заместитель министра МСМ по ядерно-оружейному направлению.



Георгий Александрович Цырков. Герой Социалистического Труда, лауреат двух Сталинских и Ленинской премий. Работал с 1948 г. в том же отделе 25 сектора 3.

С 1952 по 1955 г. – зам. начальника отдела 22. Помимо газодинамической отработки изделий, именно в этом отделе были проведены первые

успешные эксперименты (Е. А. Феоктистова, Г. А. Цырков, Р. З. Людаев) со взрывомагнитными генераторами (ВМГ). С 1955 по 1960 г. – зам. научного руководителя НИИ-1011 (ВНИИТФ), с 1960 по 1965 г. – зам. начальника, с 1965 по

1996 г. (31 год!) – начальник 5 ГУ Минсредмаша.

Будучи начальником Главка, а до этого – выходцем из отдела натуральных полигонных испытаний, он, как В. К. Боболев и Е. А. Негин, многократно выезжал руководителем испытаний на ядерные полигоны страны.

После его ухода из жизни в РФЯЦ-ВНИИТФ несколько раз проводились научно-технические конференции испытателей памяти Г. А. Цыркова.

Как и А. Д. Захаренков, он – почетный гражданин г. Снежинска.

Кого еще нет в этом «звездном ансамбле» у здания ИФВ?

Нет пока звезды первой величины – Кирилла Ивановича Щёлкина, первого заместителя Ю. Б. Харитона, начальника научно-исследовательского сектора (НИС) КБ-11, объединявшего в себе с 1948 по 1952 г. теоретиков, газодинамиков и физиков-ядерщиков (сейчас это сотрудники ИТМФ, ИФВ и ИЯРФ), основателя школы газодинамики ВНИИЭФ, начальника лаборатории № 5 (отдела 25), в которых начинали свою деятельность в КБ-11 четверо из перечисленных выше персон (В. К. Боболев, А. Д. Захаренков, Л. М. Тимонин, Г. А. Цырков), и чей пост и должности потом унаследовал Е. А. Негин.

К. И. Щёлкин – член-корреспондент АН СССР, трижды Герой Социалистического Труда, лауреат трех Сталинских и Ленинской премии, кавалер пяти орденов Ленина, основатель и первый научный руководитель РФЯЦ-ВНИИТФ. Его именем названа улица в Снежинске и город в Крыму, его бюст – на центральной площади Снежинска, есть памятник в Армении (он там жил несколько лет с родителями), был памятник в Тбилиси (он там родился), но исчез после «перестройки». В 2021 г., к его 110-летию, Российской академией наук выпущена книга «Кирилл Щёлкин: ученый, гражданин, солдат» с его научными трудами и письмами к первым лицам страны в период его научного руководства НИИ-1011 (РФЯЦ-ВНИИТФ).

А в Сарове, где его труд был отмечен основными перечисленными выше государственными наградами, есть только фотография в Музее ядерного оружия и скромная табличка у входа в здание технологического отделения. Надеемся, рано или поздно эта несправедливость будет исправлена.

Есть еще кандидатуры. Здесь мог бы быть и Борис Васильевич Литвинов, академик РАН, Герой Социалистического Труда, лауреат Ле-



Открытие мемориальной стелы, ИФВ, 2021 г.

нинской премии, главный конструктор ЯЗ в НИИ-1011 (ВНИИТФ) с 1961 по 1997 г. (с перерывом в 1965–1968 гг.), почетный гражданин г. Снежинска и Челябинской области.

Его становление как научного сотрудника прошло в 1954–1961 гг. именно здесь, в секторе 3, в отделе 23. Здесь, работая в этом здании, он вырос в должности до заместителя начальника сектора 3, после чего и был направлен в НИИ-1011 на должность главного конструктора. Здесь, в секторе 3, им совместно с В. К. Боболевым и И. В. Саниным (тоже выходец из отдела 23 сектора 3, начальник газодинамического отделения 04 ВНИИП (ВНИИТФ) в течение примерно 20 лет) была предложена новая физическая схема первичного узла термоядерных ЯЗ, реализованная потом в целом ряде конструкций РФЯЦ-ВНИИТФ.

Ну, и наконец, ныне здравствующий Герой России Лев Дмитриевич Рябев, лауреат Государственной премии СССР, бывший в разное время и директором ВНИИЭФ (1974–1978 гг.), и министром МСМ (1986–1989 гг.), и заместителем Председателя Совета Министров СССР (1989–1991 гг.). В секторе 3, в этом здании, он проработал около семи лет, прежде чем стал заметной фигурой в профессиональных и партийных кругах в масштабах всей страны.

При создании КБ-11, будущего РФЯЦ-ВНИИЭФ, первыми научными лабораториями были газодинамические, первыми и по номерам, и по сути. Численное моделирование тогда было в зачаточном состоянии. Вернее, его вообще не было, были аналитические оценки. Все решал эксперимент. Да и сейчас именно он переводит ответы на вопросы из сослагательного наклонения в утвердительное. Соответственно, велики были и роль, и ответственность эксперимента-

торов. А большие задачи и большая ответственность рождает больших людей. И поэтому обилие имен газодинамиков в хрониках первых лет ВНИИЭФ неудивительно.

Имена остальных первопроходцев ядерно-оружейного комплекса, работавших в газодинамическом секторе 3 (ИФВ) и отмеченных государственными наградами и премиями, занесены на Доску трудовой славы ИФВ. А этих имен – десятки.

Как-то, будучи в Санкт-Петербурге, мы с женой остановились на Васильевском острове возле домов, где жили многие академики, прославившие российскую науку. Обилие мемориальных досок со знаменитыми именами, именами ученых, а не публичных деятелей, физически ощущалось как апофеоз интеллекта! Неплохо бы и в Сарове, богатому на имена и события истории XX века, иметь подобные мемориальные доски в назидание потомкам не только на закрытых площадках и стенах административного здания, но и на стенах жилых домов, в которых живут и возле которых ходят наши граждане и гости города. А, скажем, в городском сквере возле художественной галереи, где сейчас стоит памятник А. Д. Сахарову, создать галерею Героев в память о героических 1940–1960-х гг., когда во ВНИИЭФ и на заводе «Авангард» работали четыре трижды Героя, несколько дважды Героев, не говоря уже о «просто» Героях. Где вы еще найдете такое созвездие, кроме столиц?

МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович –

заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор технических наук, лауреат Государственной премии и двух премий Правительства РФ

Начальное звено. Химические ВВ в ядерных зарядах

Д. В. МИЛЬЧЕНКО, А. Л. МИХАЙЛОВ

Без малого 80 лет назад в жизнь человечества вошли ядерные технологии. Изначально они были созданы для оружия массового поражения. Затем получил свое развитие «мирный атом», ставший, при грамотных технических подходах, весьма экономичным и экологичным способом получения электрической и тепловой энергии. Что же касается ядерного оружия, то и в наше время остается незаменимой его функция как средства сдерживания глобальной агрессии. Процесс его совершенствования не стоит на месте, хотя в отсутствии полномасштабных испытаний темпы (по понятным соображениям) замедлились.

Одна из значимых предпосылок для его развития – прогресс в разработке мощных химических ВВ – «начального звена» функционирования ядерных зарядов.

В 1939 г. Фредерик Жолио-Кюри (выдающийся французский физик, оставшийся в истории также как пацифист и борец за мир) запатентовал идею о том, что цепная реакция деления

урана может быть инициирована во взрывном режиме, если быстро соединить между собой две урановые детали, каждая из которых имеет массу несколько меньше критической.

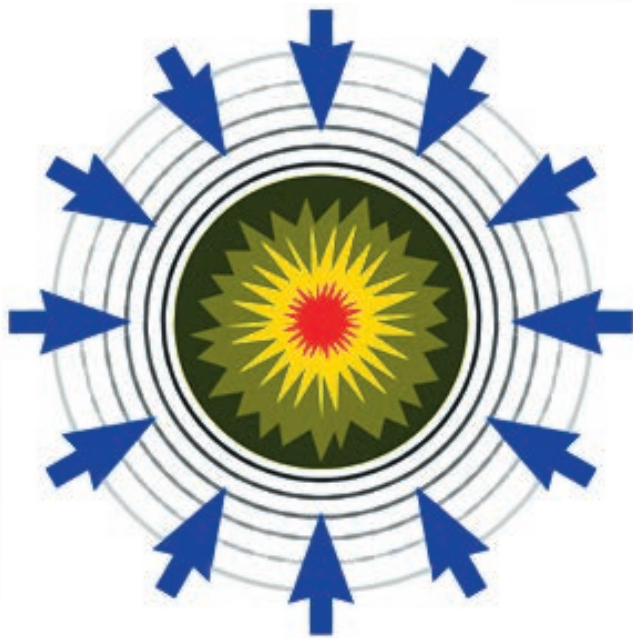
Эта простая схема позволила довольно быстро создать работоспособный ядерный заряд, и была нетребовательной к мощности применяемого ВВ. Впервые примененный в Хиросиме, без единого предварительного испытания, американский Little Boy по существу представлял собой некоторую доработку серийного артиллерийского морского орудия. Стандартного порохового заряда с избытком хватало для придания 36-килограммовой «пуле» из урана-235 достаточной скорости для столкновения с мишенью и развития цепной ядерной реакции.

При всей относительной технической простоте пушечная схема ЯЗ не получила в дальнейшем широкого распространения. Тому были фундаментальные причины. По оценкам, в бомбе Little Boy было израсходовано в цепной реакции не более 2 % урана-235. Все остальное, в значительной степени превратившись в другие изотопы, еще более опасные, чем сам уран, было разбросано по местности, обусловив чудовищный уровень ее радиоактивного заражения. При достаточно ограниченной мощности (15–30 кт ТЭ) пушечная схема заряда была признана чрезвычайно «грязной». Предпринимались определенные усилия по повышению КПД «пушечных» зарядов, но они относились к вопросам управления нейтронными потоками и не имели прямого отношения к химическим ВВ.

В плане повышения мощности ядерных боеприпасов и одновременно снижения долгоживущих радиоактивных выбросов, основное внимание исследователей было привлечено к технологии взрывной имплозии (русский перевод «обжатия»). Кроме урана-235, к цепной реакции деления способен еще плутоний-239 – изотоп, который непосредственно в природе



Испытательный взрыв одной из бомб пушечной схемы. Мощность 23 килотонны в тротиловом эквиваленте



не встречается и синтезируется в реакторах путем контролируемого облучения слаборадиоактивного урана-238. Именно различные варианты имплозивной схемы с плутонием легли в основу большей части разработанных ЯЗ. В одном из наиболее распространенных вариантов, обжатие осуществляется в сферически-симметричной постановке, к центру заряда.

Переход к имплозивной схеме привел к появлению целого комплекса новых требований к применяемым химическим ВВ. Собственно, с этого момента наука о взрывчатых веществах, предназначенных для применения в ЯЗ, и технология производства этих ВВ выделились в отдельную подотрасль, крайне важную и сегодня.

Для того чтобы обеспечить требуемый уровень обжатия плутония в заряде, необходимо создать ВВ, более мощные, чем это было достаточно для простого метания, примененного в «пушечной» схеме. Чем больше теплота взрыва ВВ и одновременно, чем больше количество газообразных продуктов, тем большая работа по обжатию делящегося материала совершается. Соответственно, при одинаковом количестве ВВ можно уменьшить количество делящегося материала в заряде. Либо напротив, решить задачу при помощи меньшего количества ВВ и, тем самым, ощутимо сэкономить в габаритах и массе заряда. Поэтому, «погоня» за увеличением мощности ВВ стала основным трендом как в отечественных, так и в зарубежных разработках ЯЗ с 1950-х по 1980-е гг.

Кроме мощности, требовалась и высокая пространственная однородность параметров детонационной и ударной волны. В идеале, формируемая в ВВ сходящаяся детонационная волна должна быть строго сферической. При этом условии, по первоначальным расчетам, за счет эффекта кумуляции к центру сферы давление должно вырасти столь сильно, что его хватило бы и для прямого инициирования термоядерного взрыва. (Это так называемый газодинамический термоядерный синтез – амбициозная, но до сих пор не решенная задача, несмотря на некоторые успехи). В реальности, одновременное инициирование ВВ по всей поверхности сферы пока энергетически недостижимо. Начальное инициирование осуществляется в ограниченном числе малоразмерных зарядов-инициаторов, откуда при помощи специально сконструированных систем формируется детонационная волна с требуемой геометрией фронта. Легко понять, что требуемая симметрия фронта волны при этом претерпевает определенные искажения, и чтобы свести их к минимуму, в системах инициирования детонации должны применяться ВВ, способные детонировать в зарядах малого диаметра (на профессиональном жаргоне – иметь маленький критический диаметр). При этом, чтобы обеспечить изготовление требуемой конструкции, имеющей сложную конфигурацию, эти ВВ должны также проявлять определенные реологические свойства.

Для облегчения конструкции во многих случаях желательно свести к минимуму применение массивных корпусов. Это означает, что существенная часть механических нагрузок ложится непосредственно на само ВВ, то есть ВВ должно в той или иной мере играть роль конструкционного материала. Достижение требуемой прочности без ухудшения взрывчатых свойств представляет собой еще один тренд в развитии науки и технологии ВВ для ядерных зарядов.

Наконец, большое внимание уделяется вопросам эксплуатационной безопасности. Современные боеприпасы (как ядерные, так и неядерные) должны выдерживать без взрыва максимально жесткие условия аварийных и несанкционированных воздействий, включая термические нагрузки при пожарах, удары при авариях, прострел пулей или осколком. В настоящее время требования международных норм по безопасности ВВ настолько высоки, что на первый взгляд вообще непонятно, как им может соответствовать вещество, по определению являющееся взрывчатым. Тем не менее, и в этом направле-

нии учеными и технологами проводится значительная и результативная работа.

Не существует ни одного ВВ, которое в равной степени удовлетворяло бы всем требованиям одновременно. Например, невозможно сочетать в одном продукте пластичность и высокую механическую прочность. А малочувствительное ВВ едва ли может иметь малый критический диаметр детонации. Поэтому в современных изделиях применяют различные виды ВВ, с комплексом свойств, максимально соответствующих совокупности требований.

Двадцать лет назад («Атом», 2002, № 21, с. 41–44) многолетний руководитель профильного отдела химии и технологии ВВ Института физики взрыва, д.т.н. Л. В. Фомичева опубликовала обзор основных достижений отечественных исследователей в области химии и технологии взрывчатых веществ, применяемых в ядерных боеприпасах. Здесь мы отметим основные вехи развития в этой области, уделив внимание и более новым достижениям.

В первых ЯЗ периода 1949–1954 гг. был применен литьевой взрывчатый состав ТГ на основе тротила и гексогена, который широко использовался и в неядерных вооружениях. Однако уже тогда было понятно, что применение «универсального» ТГ есть полумера, вынужденная ограниченным развитием тогдашней науки и технологии ВВ. Для создания ЯЗ с лучшими эксплуатационными характеристиками требовалась разработка новых взрывчатых составов, обладающих как более высокой мощностью, так и более высокими технологичностью и физической стойкостью.

В течение 50-х гг. XX века были проведены интенсивные исследования в ряде академических и отраслевых институтов, направленные на синтез новых ВВ повышенной мощности. Вероятно, ни в какой другой период времени исследования по синтезу новых ВВ не велись с такой интенсивностью. Однако в конечном счете в серийное производство пошел взрывчатый состав, не потребовавший применения принципиально новых компонентов. Означает ли это, что усилия по поиску новых ВВ были неэффективны, либо потрачены зря? Разумеется, нет. Проведенные исследования дали мощный толчок науке органического синтеза и их результаты пригодились для освоения многих химических продуктов, полезных для народного хозяйства. Но разработчикам взрывчатого состава удалось достичь заданных показателей в целом максимально экономично, эволюционным путем, ис-

пользуя уже сложившуюся сырьевую базу. Как и его предшественник ТГ, новый состав содержал в своей рецептуре гексоген и тротил, однако исследователям удалось не только существенно поднять мощность, но и улучшить технологические свойства разработанного ВС.

В 1960-е гг. произошел качественный скачок в устройстве детонаторов – миниатюрных, но крайне важных составных частей заряда, предназначенных для его первоначального инициирования. До определенного периода в детонаторах использовались специальные высокочувствительные «инициирующие» ВВ, например, азид свинца и подобные ему соединения. Технически с задачей инициирования вторичных (бризантных) ВВ они справлялись, но степень опасности в обращении с ними была слишком велика. Всегда существовал риск несанкционированного срабатывания при каких-либо нештатных воздействиях. Поэтому были разработаны и внедрены электродетонаторы на основе вторичных ВВ. В результате сложных многофакторных экспериментов вторичное ВВ «научили» работать аналогично прежнему инициирующему, при этом значительно повысив безопасность всей конструкции.

Тем временем гонка за мощностью основного ВВ продолжалась. Одна из разработок советских ученых позволила предложить взрывчатый состав, который и по сей день остается наиболее мощным из всех, когда-либо намечавшихся к применению. Его взрывчатые характеристики были исключительными. Уже было принято решение о подготовке к серийному производству вновь разработанного ВВ и состава на его основе. Однако, расширенные испытания выявили некоторые опасные свойства нового ВВ. Его недостаточная химическая стабильность могла привести к инцидентам при длительном хранении изделия. Внедрение не состоялось, но поиск новых мощных ВВ прекращен не был.

Внимание исследователей сосредоточилось на таком мощном ВВ, как октоген. Октоген по своей химической структуре имеет сходство с гексогеном. Он может производиться из того же сырья и по сходной технологии. А вот мощность его заметно выше. Октоген имеет и более высокую термическую и химическую стабильность. Таким образом, снова открывалась возможность эволюционного развития при переходе к новому поколению ВВ. И эта возможность была сполна использована. Первое поколение разработанных октогеновых составов имело ту же связку, что и их гексогеновый предшественник. Однако, в

результате тщательной работы по оптимизации (проверено более 20 вариантов рецептуры), содержание связки было сведено к допустимому минимуму. Это дало двойной выигрыш – как за счет замены основного компонента на более мощный, так и за счет увеличения его количества. Использование составов на основе октогена позволило сделать новый шаг в уменьшении габаритов зарядов и повышении их характеристик. Поэтому именно ядерные заряды с октогеновыми составами в свое время имели не только военное, но и гражданское применение. Они использовались в народном хозяйстве СССР для проведения масштабных горных работ, сооружения подземных хранилищ, тушения пожаров на нефтегазовых скважинах и др.

Разработка и внедрение первого октогенового термопластичного ВС была удостоена Государственной премии СССР в 1970 г. В числе авторского коллектива от ВНИИЭФ – Людмила Валентиновна Фомичева.

Также в 60-х гг. XX в. возникла необходимость в разработке специализированного пластичного ВС. Разработка новых пластичных ВС велась отнюдь не в догоняющем режиме – «у нас возникла проблема и теперь мы будем ее решать». Необходимые изменения были спрогнозированы, и разработки стартовали заблаговременно. В результате были предложены пластичные ВС на основе тэна (ВНИИЭФ: В. М. Некруткин, Л. В. Фомичева, И. П. Хабаров и др.) и на основе гексогена (ВНИИТФ: Е. А. Феоктистова, Б. Г. Лобойко, В. П. Филин и др.). Первый характеризовался более высокой детонационной способностью, что имело существенное значение. Второй обеспечивал более высокую термическую стойкость и несколько меньшую чувствительность. После первоначального периода достаточно острой конкуренции между этими

разработками сформировался круг изделий, где применение того или другого из разработанных ВС было наиболее рациональным.

1970–1980-е гг. характеризовались интенсивной работой над мощными термостойкими составами на основе октогена для применения их в самых различных конструкциях, практически без температурных ограничений при эксплуатации.

Для этого пришлось провести большую работу по выбору полимерных связующих, которые обеспечивают высокую термостойкость и высокую прочность. А также заново отладить технологию изготовления деталей из ВС с новым связующим и при более высоких температурах.

В конечном счете, совместными усилиями предприятий Росатома (на ту пору – Минсредмаш СССР) все поставленные вопросы были решены, и октогеновые составы второго поколения пошли в серию. Разработчики этих ВС также были награждены Государственной премией СССР за 1983 г. В числе лауреатов от ВНИИЭФ – С. М. Бабадей и Л. В. Фомичева.

С конца 1980-х гг. проявляется новая тенденция: принципиальное, качественное повышение безопасности ВВ. Было сочтено возможным и целесообразным в ряде случаев использовать малочувствительное ВВ, даже если оно будет несколько уступать по мощности октогену. Естественным кандидатом на роль нового ВВ для компоновки взрывчатого состава явился триаминотринитробензол (ТАТБ). Это вещество детонирует только при действии достаточно мощного инициатора, и на протяжении многих десятилетий после первого своего синтеза оно вообще не считалось взрывчатым (применялось как желтый краситель, в том числе пищевой). Кроме очень малой механической чувствительности, ТАТБ характеризуется и малой пожарной опасностью, трудно воспламеняется и почти



В. М. Некруткин



Е. А. Феоктистова



Б. Г. Лобойко



И. П. Хабаров

не горит (тлеет в беспламенном режиме). Для взрывчатых веществ такой комплекс свойств уникален, поэтому ВС на основе ТАТБ вызвали несомненный интерес.

При разработке нового малочувствительного ВС был в полной мере учтен богатый научный и технологический опыт, накопленный при разработке октогеновых составов. Однако ТАТБ и составы на его основе проявили ряд особенностей, сделавших не всегда возможным прямое копирование ранее известных подходов к изготовлению деталей. В частности, это сильная пространственная анизотропия кристалла. Потребовалась заметная корректировка технологических режимов изготовления деталей и их последующей стабилизации.

В 2002 г. коллектив разработчиков малочувствительного, пожаробезопасного взрывчатого состава на основе ВВ ТАТБ был награжден премией Правительства РФ (ВНИИЭФ: Л. В. Фомичева, И. П. Хабаров).

Как отмечалось выше, для устойчивого инициирования ВС на основе ВВ ТАТБ необходим мощный детонатор. В принципе, некоторые из уже разработанных ВС могли выполнять эту функцию. Однако они либо не обеспечивали желаемых механических свойств, либо сильно уступали ТАТБ по уровню безопасности (что обесценивало саму идею). Для оптимального решения данной проблемы, по инициативе ВНИИЭФ был разработан новый термопластичный взрывчатый состав с заданным комплексом свойств. Он обеспечивает инициирование малочувствительного ВВ, обладает достаточной конструкционной прочностью и при этом не оказывает критичного влияния на общий уровень безопасности конструкции. Стоит отметить, что и в данном случае при компоновке состава разработчикам удалось обойтись без использования каких-либо принципиально новых, не производимых отечественной промышленностью индивидуальных ВВ.

В 1990-х, начале 2000-х гг. возникли серьезные проблемы с поддержанием технологий производства ВВ для ЯЗ из-за перестройки экономики страны. И в частности, в ту пору началась глобальная кампания по запрещению производства и применения фреонов (фторированных углеводородов). Прессой был поднят немислимый ажиотаж по поводу «озоновых дыр» в атмосфере, якобы возникающих под действием фреонов и способных уничтожить все человечество ввиду проникновения космической радиации. Россия была вынуждена также взять на



С. М. Бабадей



Л. В. Фомичева

себя ограничительные меры по использованию фреонов. А один из них считался незаменимым растворителем на определенной стадии производства ВС.

Ситуация выглядела как минимум неприятно. Впервые разработчики технологий ВВ оказались в ситуации вынужденного реагирования, причем с совершенно неясной перспективой. Начались интенсивные исследования по замене фреона. И здесь упорство и смекалка специалистов вновь принесли свои плоды. Было установлено, что в принципе вместо фреона можно использовать другой растворитель, причем более распространенный, недорогой и достаточно безопасный в обращении (применяется в парфюмерной продукции). Однако это еще не обеспечивало окончательного успеха. Растворы полимеров – объект сложный, структурное состояние полимера могло измениться, что теоретически могло привести к нарушениям технологичности и стойкости формируемого ВС. Поэтому был запущен полный цикл отработки ВС, в таком объеме, как если бы «с нуля» создавалась принципиально новая взрывчатка. Через некоторое время стало понятно, что расчет разработчиков оправдался – все испытания и тесты давали положительный результат. Свойства ВС и изготовленных из него деталей полностью соответствовали ранее партиям, изготовленным по старой технологии. Таким образом, он мог применяться без каких-либо дополнительных условий и ограничений.

За работу по созданию и внедрению технологий, адаптированных к новым экономическим условиям, авторский коллектив был отмечен премией Правительства РФ за 2010 г. Один из лауреатов той премии (С. А. Вахмистров) и сегодня продолжает плодотворно трудиться в отделе химии и технологии ВВ ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ. К сожалению, второй соавтор разра-



С. А. Вахмистров



Н. Н. Титова

ботки, Н. Н. Титова, скоропостижно и безвременно скончалась 28.11.2021 г. в расцвете творческих сил.

Любопытно, что после запуска новой технологии в серию, шумиха мирового масштаба вокруг «опасности» фреонов стала как-то быстро стихать и вскоре практически сошла на нет. Экспертами было признано, что вредоносное действие этих веществ на атмосферу было в десятки раз преувеличено, а сама кампания была следствием конкурентной борьбы на рынке бытовой химии. Запрет на фреоны сильно смягчился, да и «озоновые дыры» в значительной степени вдруг «затянулись».

У читателя, пожалуй, может сложиться впечатление, что работа наших исследователей в области ВВ состоит в основном из сплошных инноваций и внедрений. Это не совсем так. Преобладающая доля приходится на вполне рутинные плановые работы по контролю качества изготовленных партий индивидуальных ВВ и ВС на их основе, а также партий, находящихся на хранении. Эти работы совершенно необходимы, поскольку должна быть гарантирована идентичность свойств всех партий. Особенно важно поддерживать стабильность качества и свойств в условиях, когда полномасштабные испытания недоступны.

Тем не менее, поисковые и внедренческие работы продолжают сегодня и будут продолжаться впредь. В наши дни в области технологии ВВ, как и в других областях оборонной техники, особую важность приобретает импортозамещение. Необходимо полностью исключить использование импортного сырья и комплектующих при производстве индивидуальных ВВ и составов на их основе. А это влечет за собой большой объем работы с потенциальными производителями и их продукцией. Наряду с этим стоит задача создания дублирующих про-

изводства индивидуальных ВВ, чтобы повысить надежность обеспечения ими. Анализ и испытания продукции альтернативных поставщиков также целиком ложатся на плечи специалистов.

Однако и поисковые исследования, и новые разработки не затихают. Так, в институтах Росатома ведутся поиски технологий переработки индивидуальных ВВ, позволяющих повысить детонационную способность ВС на их основе. Применяются различные подходы к этой проблеме. В частности, во ВНИИЭФ разработан пластичный состав на основе гексогена с повышенной детонационной способностью. Он включает в себе лучшие черты более ранних разработок, сочетая при этом работоспособность в зарядах малого диаметра и термическую стойкость. Используемый для этого технологический процесс – принципиально новый, он не применялся ранее на предприятиях отрасли. Продолжаются и поисковые работы в области создания новых видов детонаторов. На сей раз речь идет о замене электрического инициирования на инициирование лазерным импульсом. Это в перспективе может существенно повысить устойчивость к различным видам электромагнитных помех.

Ряд российских организаций, занимающихся синтезом энергетических материалов, работают по заданию наших институтов и в тесной кооперации с ними над разработкой новых веществ и новых методов синтеза. Главный интерес здесь сосредоточен на проблеме создания малочувствительных ВВ высокой мощности.

В целом коллективы разработчиков ВВ, поддерживая в своей работе компетентность и профессионализм, готовы и впредь решать ответственные задачи, которые будут поставлены перед ними в интересах развития ЯОК России.

Впрочем, науки и технологии развиваются по своим законам, в зависимости от потребностей и технологической готовности общества, и те вехи в создании ВВ для ЯЗ, о которых мы рассказали, характерны для всех государств ядерного клуба независимо от географических границ и общественного строя.

МИЛЬЧЕНКО Дмитрий Владимирович –

кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ

МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович –

заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор технических наук, лауреат Государственной
премии и двух премий Правительства РФ

Физика детонации и лазерная интерферометрия

А. В. ФЕДОРОВ

В 1982 г. А. Л. Михайлов написал отчет-предложение, где обосновал создание во ВНИИЭФ лазерной доплеровской методики для исследований газодинамических процессов. В 1983 г. за основу приборной методики были взяты газовый йодный лазер, применяемый в отделении 13, и



А. Л. Михайлов

интерферометры Фабри-Перо. Регистрация интерферограмм велась на имевшийся в нашем распоряжении обычный фотохронограф с оптико-механической коммутацией изображения. Для согласования инфракрасного излучения йодного лазера (длина волны 1,315 мкм) с областью спектральной чувствительности фотопленки его излучение преобразовывалось во вторую гармонику (0,658 мкм) на кристаллах дигидроарсената цезия (ДСДА). Выходная мощность излучения лазера позволяла это сделать при надлежащей фокусировке.

Группа состояла из А. Л. Михайлова, Б. А. Поклонцева, А. В. Федорова, А. В. Меньшиха и, позже, Н. Б. Ягодина. Уже в 1983 г. аппаратный комплекс был создан и получены первые результаты регистрации в лабораторных условиях скорости движения лайнеров, метаемых электровзрывом. В 1985 г. лазерный интерферометрический комплекс по схеме Фабри-Перо (ЛИФП) был собран в каземате на площадке и начались исследования ударно-волновых и детонационных процессов с применением взрывчатых веществ. В 1988 г. в состав комплекса был введен твердотельный рубиновый лазер мощностью 150 Вт, более удобный в обращении. С его помощью в дальнейшем и были получены излагаемые ниже научные результаты. Йодный лазер с преобразованием излучения во вторую гар-

монику по технологическим причинам ушел в прошлое. Остановимся на некоторых интересных результатах, полученных при исследовании детонации.

Детонация по Щёлкину

В 1926 г. англичане Кэмпбелл и Вудхед открыли явление спиновой газовой детонации. (От английского spin – кручение, штопор). Здесь воспламенение газовой смеси сосредоточено в ядре (голове спина), фронт горения движется вперед и одновременно вращается вокруг оси трубы, куда помещался газ. За ядром, как хвост за головой кометы, тянется зона горения, заполняющая всё сечение трубы. Теорию спиновой детонации в газах создал в 1945 г. К. И. Щёлкин (Докл. АН СССР. 1945. Т. 47. С. 501).



К. И. Щёлкин

Также было выяснено, что спиновая детонация возникает вблизи пределов ее распространения, и ядро спина представляет собой косую ударную волну. При увеличении диаметра трубы, когда на ее сечении могут разместиться два и более косых скачка, возникает двух-, трех- и более головной спин. В 1959 г. Я. К. Трошин и Ю. Н. Денисов показали, что по поверхности детонационного фронта может двигаться много возмущений, которые отражаются друг от друга с локальными усилениями и пульсациями волн.

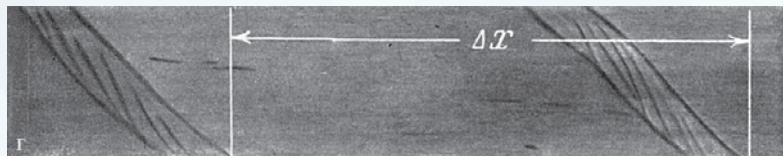
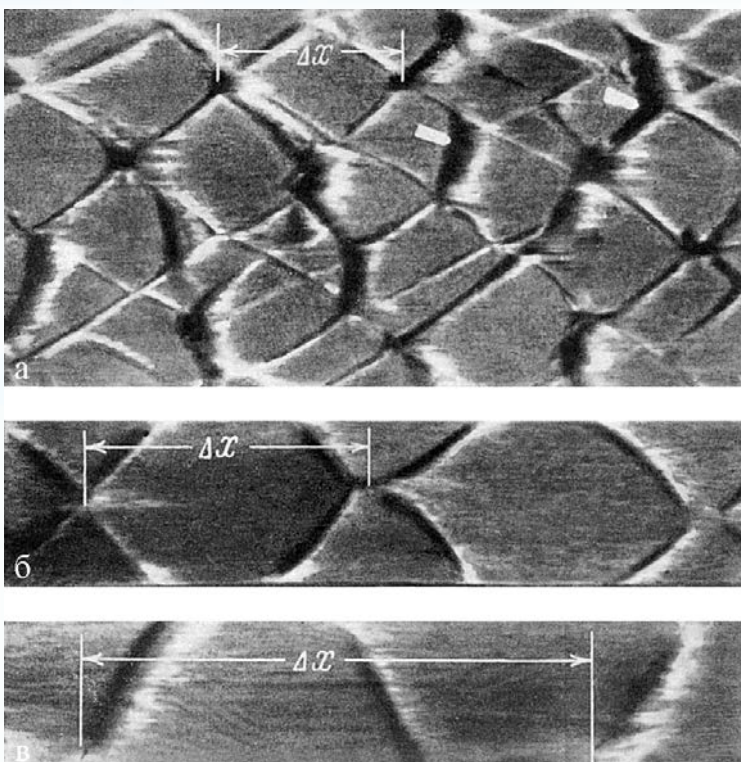


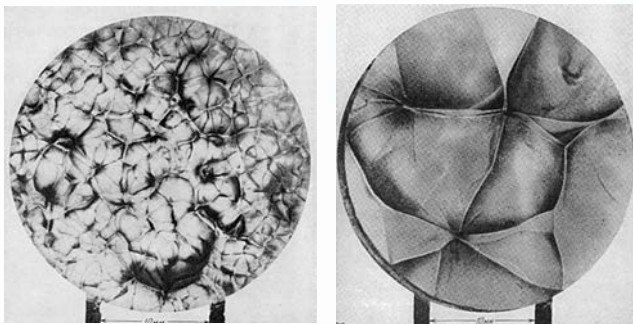
Фото следового отпечатка спиновой детонации на боковой стенке трубы. Видна тонкая структура спина в виде косых линий



Следовые отпечатки пульсирующей газовой детонации на боковой поверхности трубы. Размер ячейки Δx растет на трех отпечатках от 1 до 6 мм при уменьшении давления газа в трубе в 8 раз

В местах отражений волн смесь зажигается легче, чем в косых скачках, а фронт детонации пульсирует. Таким образом, создаются зоны с более высокой, чем в плоской волне, температурой – очаги воспламенения.

Таким образом, Я. К. Трошин и Ю. Н. Денисов открыли явление ячеистой структуры детонационной волны. Тогда же Б. В. Войцеховский (незадолго до этого уехавший вместе с академиком М. А. Лаврентьевым из Сарова в Новосибирск) экспериментально обнаружил существование поперечных детонационных волн, объясняющих явление спиновой детонации. Р. И. Со-

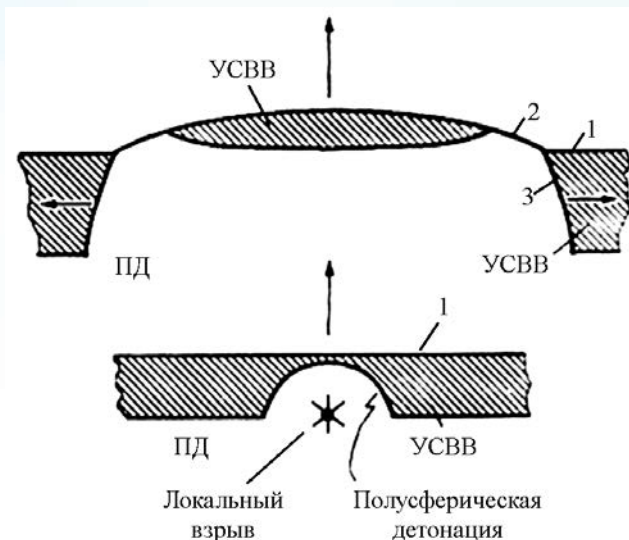


Следовые отпечатки ячеек пульсирующей детонации на торце трубы для двух давлений газовой смеси

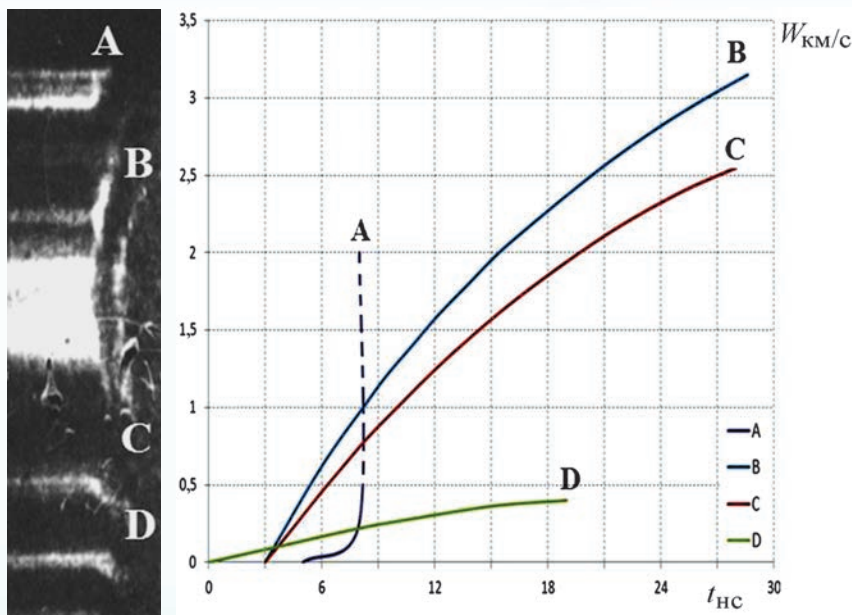
лоухин провел детальное исследование структуры детонационной волны в газах, условия перехода горения в детонацию, структуры спиновой детонации и причин ее возникновения. В 1965 г. работы Я. К. Трошина, Б. В. Войцеховского и Р. И. Солоухина были отмечены Ленинской премией (К. И. Щёлкин Ленинскую премию получил за первое серийное термоядерное изделие раньше – в 1958 г. А Ленинская премия, в отличие от Звезды Героя, давалась только один раз). Из этих исследований ясно, что явление детонации куда богаче классической одномерной модели Зельдовича–фон Неймана–Деринга (ЗНД-модель).

А. Н. Дремин с сотрудниками позже наблюдал пульсирующий детонационный фронт в жидких гомогенных низкочувствительных ВВ. Было установлено, что в ВВ сначала распространяется ударная, а затем по ударно-сжатому и нагретому ВВ – детонационная волна. По фронту волны от точек локальных взрывов движутся косые и поперечные детонационные волны. При их столкновении реализуются повышенные давления, где участок фронта уходит вперед, попадает

в холодное ВВ и происходит срыв реакции. Данная ситуация воспроизводится многократно – так распространяется пульсирующая многого-



Картина распространения пульсирующего детонационного фронта в жидких ВВ по А. Н. Дремину: 1 – прямая ударная волна, 2 – косая детонационная волна, 3 – поперечная волна детонации, ПД – продукты детонации, УСВВ – ударно-сжатое ВВ



Интерферограмма и зависимости нарастания скорости в пульсирующем детонационном фронте, зарегистрированные на линиях (A, B, C, D) с помощью лазерного интерферометра Фабри-Перо

ловая детонация по Щёлкину. Было установлено, что такая детонация характерна только для низкочувствительных ВВ на пределах ее распространения.

А. Н. Дремин с сотрудниками даже разбавляли жидкие ВВ инертном, чтобы возникал пульсирующий режим детонации. Таким образом, считалось, что пульсирующая детонация существует только в газах и низкочувствительных жидких ВВ. Но все оказалось сложнее.

В конце 1990-х гг. с помощью более тонкого инструмента – лазерного интерферометра Фабри-Перо нами было показано, что пульсирующий фронт существует и в мощных высокочувствительных смесевых жидких ВВ, типа горючее/окислитель. При малом количестве горючего в смеси фронт был стабильный и устойчивый в соответствии с моделью ЗНД. Если увеличить количество горючего до некоторого предела, фронт становится неустойчивым и пульсирующим. В местах столкновения детонационных волн давление в наших экспериментах достигало 55 ГПа, при срыве реакции давление в ударной волне равнялось 17 ГПа, при среднем давлении детонации во фронте 21,4 ГПа. Например, для смеси тетранитрометан/нитробензол 74/26 (цифры обозначают процентное содержание компонентов) на разных интерференционных линиях (схема ЛИФП хороша для некоторых приложений тем, что в каждый момент времени каждая конкретная точка интерферограм-

мы однозначно соответствует конкретной точке зондируемой поверхности) зарегистрированы разные темпы нарастания массовой скорости на границе жидкое ВВ/окно до $W = 0,4-3,2$ км/с (максимальное давление в ЖВВ для $W = 3,2$ км/с составило 55 ГПа). Разные интерференционные линии регистрируют разные профили и разное время выхода волны на границу ЖВВ/окно из LiF. Кривизна детонационного фронта приводит к развороту этой границы, уходу лазерного луча со щели регистратора и обрыву записи.

В мощных смесевых ЖВВ окислитель является взрывчатым веществом, а горючее не детонирует. Горючее тормозит химическую реакцию и увеличивает критическое давление ини-

цирования детонации. Когда величина критического давления меньше давления детонации, фронт устойчив. Когда величина критического давления превышает давление детонации, тогда природа ищет другие пути для инициирования ВВ и они реализуются в пульсирующей детонации по Щёлкину. Здесь уже окислитель детонирует в косых и поперечных волнах и вступает в реакцию с горючим. Причем такие мощные составы настолько чувствительны, что детонация в них реализуется в тонких жидких слоях, толщиной в доли миллиметра (см. статью Е. В. Зотова «Запах жидкого ВВ», «Атом», 2007, № 33).

Детонация монокристаллов ВВ

В мире в основном исследуется детонация гетерогенных смесевых ВВ, но нас интересовали параметры детонации, когда ВВ представляет собой монокристалл. Выращивание таких кристаллов представляет сложную технологическую задачу. Когда мы впервые увидели такой монокристалл октогена размером с куриное яйцо, то загорелись идеей найти такие кристаллы и исследовать их детонационные характеристики. Такие большие монокристаллы выращивали когда-то в Казанском научно-исследовательском технологическом университете (КНИТУ). Автор этих работ был уже на пенсии, и все просьбы к его коллегам вырастить монокристаллы ВВ не увенчались успехом. Но нам сопутствовала удача.



Исследователи физики детонации: Д. В. Назаров, А. В. Федоров, В. А. Давыдов, А. В. Меньших, С. А. Финюшин

Однажды наш коллега из отделения 19 В. Н. Лашков сказал, что у них на складе давно лежат какие-то монокристаллы ВВ, и они их собираются уничтожить. Мы быстро нашли эти монокристаллы. К сожалению, большинство из них имели размеры с ноготок, но нашлось и несколько крупных монокристаллов размером до 14 мм. Это были монокристаллы ТЭНа в кристаллографической ориентации (100) и кристаллы октогена в ориентации (111). Для исключения боковых разгрузок мы их в опытах окружали пластическими ВВ с близкими детонационными характеристиками, а детонацию в них вводили составами на основе ТЭНа и октогена. В результате в монокристаллах были зарегистрированы самые высокие параметры детонации. Так, например, для монокристалла октогена давление в химпике составило 61 ГПа (тогда как для гетерогенного состава с содержанием октогена около 95 % давление равнялось 49 ГПа). Давление детонации монокристалла ТЭНа составило 43 ГПа вместо 39 ГПа для гетерогенного состава. Также сильно увеличилась длительность зоны химической реакции, что согласуется с моделью развития детонации на дефектах структуры. Для монокристалла октогена длительность зоны увеличилась в 3 раза до 270 нс, а для монокристалла ТЭНа – до 95 нс.

Что касается традиционных гетерогенных смесевых взрывчатых составов, содержащих индивидуальное ВВ и технологические связки, то лазерная доплеровская диагностика позволила обнаружить в них гетерогенность (неоднородность) течения продуктов взрыва за фронтом детонационной волны и разнородность по площади ее фронта – явлений, до сих пор не учитываемых в практических приложениях. В общем-то, эти неоднородности кажутся удивительными, учитывая гетерогенность смесевых ВВ, но возникает вопрос – каковы масштабы гетерогенности течений, как они связаны со структурой и составом исходного ВВ и проявляется ли она в гомогенных твердых ВВ. (В газах и жидкостях, как мы видели, проявляется.) Эти вопросы еще ждут своих исследователей.

ФЕДОРОВ Алексей Викторович –
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ,
лауреат премии Правительства РФ

В 2015 г. коллективу из 10 сотрудников нескольких организаций, среди которых семь человек представляли ВНИИЭФ (пятеро – ИФВ и двое – еще не присоединенный тогда к ВНИИЭФ нижегородский «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова»), была присуждена премия Правительства РФ за «разработку научных основ, создание аппаратных комплексов, алгоритмов и программных средств и практическое применение методов микроволновой диагностики быстропротекающих процессов». В коллектив входили еще трое представителей известных школ радиопроизводителей Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского и Московского энергетического института. Работа проходила по открытой тематике, что было достаточно необычно для ядерно-оружейного комплекса, а поэтому и для «Росатома» в целом. И тем не менее в том числе и благодаря поддержке тогдашнего президента РАН В. Е. Фортова работа «прошла».

Микроволновая интерферометрическая диагностика – невозмущающий (т. е. не вносящий возмущений в исследуемое явление или процесс) метод определения параметров движения объектов, отражающих зондирующее излучение, использующий известный в физике эффект Доплера и работающий в миллиметровом диапазоне длин радиоволн, называемых в радиотехнике микроволнами.

Этот метод известен исследователям быстропротекающих процессов достаточно давно, во всяком случае, он появился в их арсенале до появления методов лазерной доплеровской диагностики. Это вполне объяснимо, так как радиопроизводители обычно работают с монохроматическим излучением, что необходимо для выделения доплеровского сдвига, в отличие от оптиков, до 60-х гг. XX века имевших дело в основном с некогерентным излучением (за исключением линейчатых спектров излучения атомов). Именно в среде радиопроизводителей появились первые квантовые генераторы направленного монохроматического излучения: вначале мазеры, а затем и лазеры оптического и позже рентгеновского диапазона длин волн.

И тем не менее лазерные доплеровские методы сейчас известны и применяются более широко, чем микроволновые, что связано с их боль-

шей прецизионностью и возможностью создания многоканальных систем, вытекающими из меньшей, почти на четыре порядка величины, длины волны зондирующего излучения. Другая причина, по нашему мнению, – непривычный для специалистов в физике взрыва инструментарий радиопроизводителей.

Но у радиоволн есть одно неоспоримое преимущество перед волнами оптического диапазона – они способны «видеть сквозь стены» – там, где оптика бессильна. При этом класс радиопрозрачных сред гораздо шире, чем класс оптически прозрачных.

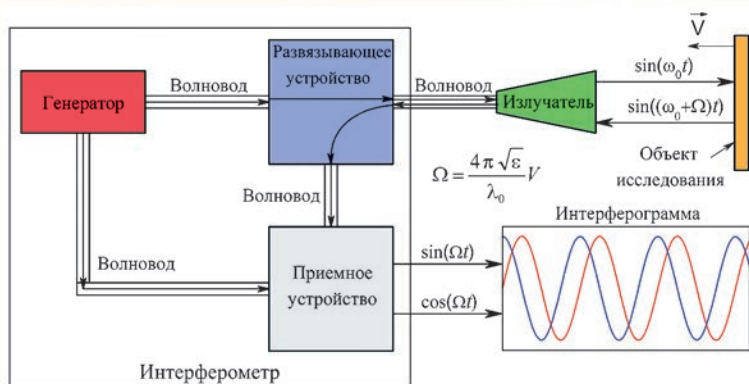
Есть и другие преимущества, используемые в наших исследованиях. Иными словами, оба метода доплеровской диагностики, различаясь по своим возможностям, взаимно дополняют друг друга.

Принципиальные структурные схемы лазерных и микроволновых доплеровских интерферометров схожи: монохроматическое излучение генератора с частотой ω разделяется на два плеча – зондирующее с частотой $\omega + \Omega$, испытывающее доплеровский сдвиг F при отражении от движущегося объекта, и опорное с исходной частотой ω ; в детекторе эти два сигнала «взаимодействуют», в результате чего на выходе интерферометра формируется сигнал с доплеровской частотой Ω . Но аппаратное их оформление принципиально различается.

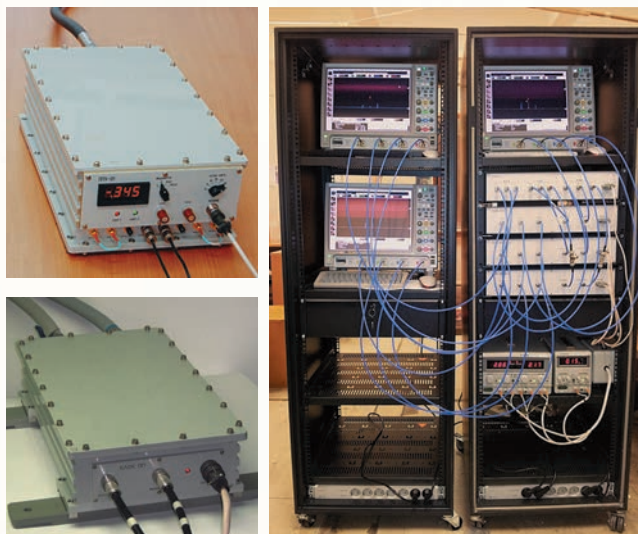
Интерферометр миллиметрового диапазона состоит из генератора электромагнитных колебаний, развязывающего устройства, излучателя (антенны), приемного устройства и блока регистрации данных. Высокочастотные элементы схемы соединены волноводным трактом. Исследуемый объект может находиться в непосредственном контакте с излучателем интерферометра, либо на некотором удалении. Среда между антенной и объектом должна быть радиопрозрачной.

На выходе интерферометра формируются два сигнала, разность фаз между которыми составляет 90° (квадратурные сигналы).

Микроволновые радиоинтерферометры, применимые для проведения исследований детонационных и ударно-волновых процессов в условиях лабораторий и полигонов, разрабатываются с учетом технических требований ИФВ «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и производятся в филиале ФГУП



Обобщенная структурная схема интерферометра



а
б
Внешний вид одноканальных (а) и многоканального (б) интерферометров

«РФЯЦ-ВНИИЭФ» – «НИИИС им. Ю. Е. Седакова». На рисунке представлены несколько типов радиоинтерферометров с длиной волны зондирующего излучения 3,2 мм.

Регистрация интерферограмм осуществляется осциллографами с полосой пропускания, необходимой для регистрации выходных сигналов радиоинтерферометра, – до 2,5 ГГц.

Продемонстрируем некоторые результаты использования микроволновых радиоинтерферометров в исследованиях быстротекущих процессов.

Вследствие прозрачности взрывчатых веществ для зондирующего микроволнового излучения с использованием радиоинтерферометров возможно получение информации о процессах внутри ВВ, таких как инициирование и распространение детонации, а также изэнтропическое расширение продуктов взрыва. В зоне химиче-

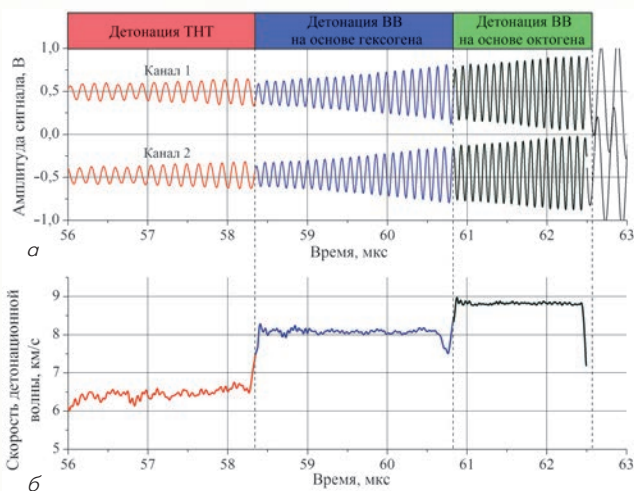
ских реакций во взрывчатых веществах реализуются высокие давления и температуры, что приводит к скачку плотности и ионизации продуктов детонации и возникновению высокой проводимости, благодаря чему зондирующее излучение радиоинтерферометра отражается от фронта детонационной волны.

Ниже приведена экспериментальная интерферограмма и полученная при ее обработке зависимость скорости детонации от времени в заряде, составленном из нескольких типов ВВ: тринитротолуола (ТНТ), гексогена и октогена.

Полученные с помощью радиоинтерферометра результаты демонстрируют непрерывную регистрацию по всей длине составного заряда и скачкообразное изменение скорости детонационной волны при движении ее в слоях из разных ВВ.

На следующих двух рисунках представлен пример типичной интерферограммы, зарегистрированной в опыте по инициированию детонации в ВВ на основе октогена расходящейся ударной волной, созданной генератором, состоящим из электродетонатора, активного заряда ВВ и преграды из оргстекла, а также результаты ее обработки, откуда видно, что с использованием радиоинтерферометра удается надежно зарегистрировать не только движение детонационной волны в образце ВВ, но и движение детонационной волны в активном заряде и ударной волны в преграде.

При выявлении закономерностей процессов инициирования детонации обычно используются результаты относительно простых экспери-

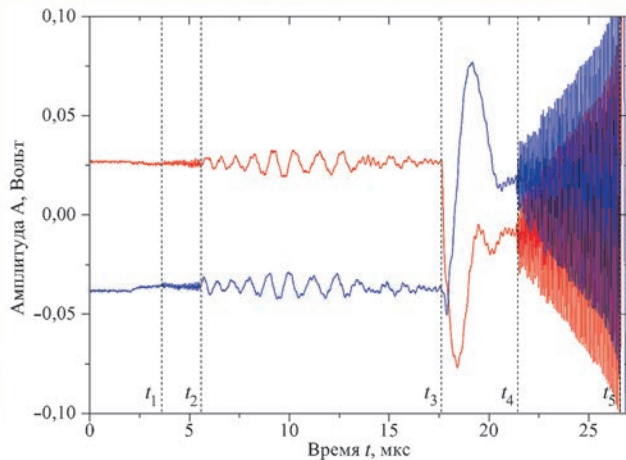


Экспериментальная интерферограмма (а) и зависимость скорости детонации от времени в составном заряде ВВ (б)

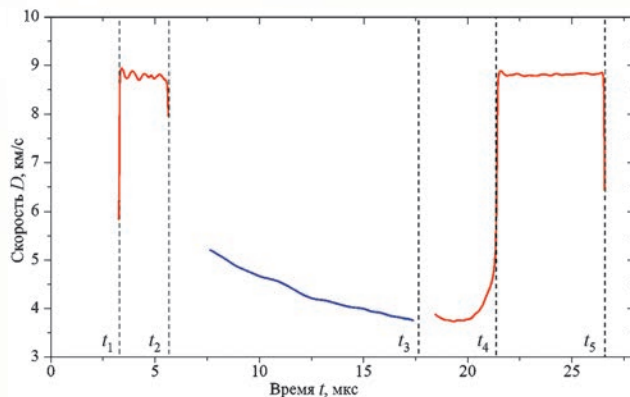
ментов при максимальном количестве зафиксированных параметров и варьировании какого-либо одного из них (давление на фронте ударной волны, длительность импульса, начальная плотность, начальная температура, ударно-волновая чувствительность и т. д.). Одним из основных типов подобных тестовых экспериментов являются эксперименты по определению длины преддетонационного участка при инициировании детонации ударными волнами.

Ранее для получения подобной информации использовались разные методики, которые сейчас во ВНИИЭФ не используются в связи с внедрением в подобные исследования микроволновой диагностики, что позволило существенно расширить диапазоны изменений параметров ударных волн в образцах и увеличить информативность экспериментов.

Пример типичной интерферограммы процесса инициирования ВВ ударной волной, вышед-



Интерферограмма эксперимента

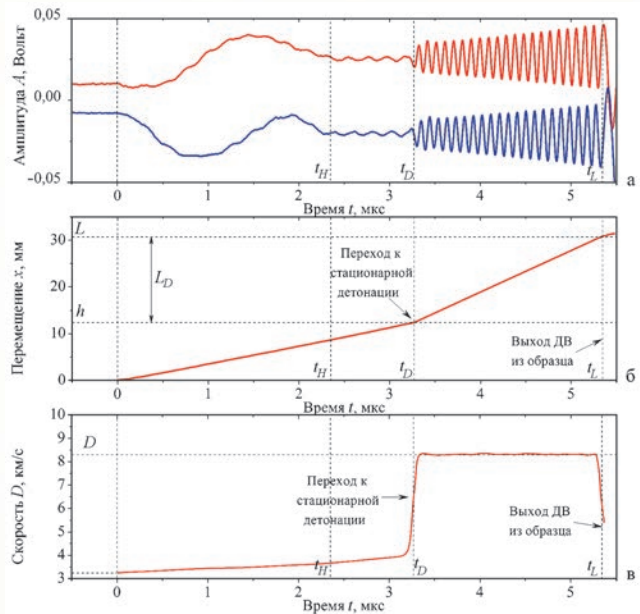


Зависимости скорости фронтов ударной и детонационных волн от времени. t_1-t_2 – детонация активного заряда; t_2-t_3 – движение ударной волны в преграде; t_3-t_4 – переход к детонации в образце ВВ; t_4-t_5 – детонация образца ВВ

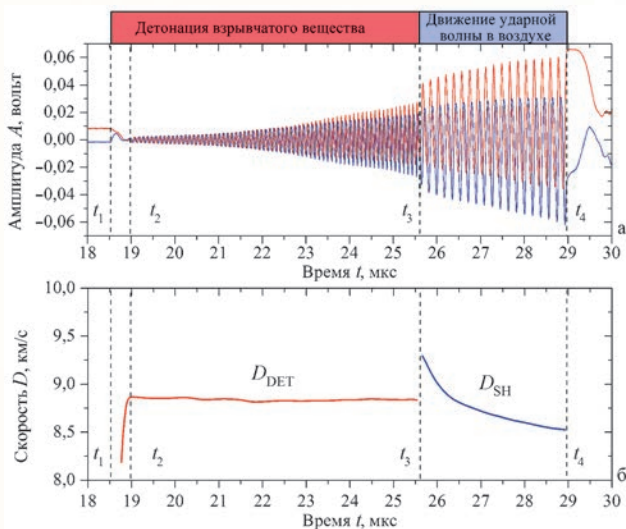
шей из металлического экрана, и результаты ее обработки приведены на следующем рисунке в виде зависимостей перемещения и скорости фронта инициирующей ударной волны и детонационной волны от времени. Обращает на себя внимание одновременное присутствие на интерферограмме высокочастотной и низкочастотной составляющих сигнала на интервале от $t = 0$ до $t = t_H$. Здесь высокочастотная составляющая отвечает доплеровскому сдвигу частоты излучения, отраженного от фронта ударной волны, а низкочастотная – отраженного от поверхности металлического экрана, которая несет информацию о массовой скорости ВВ за фронтом ударной волны. Исчезновение низкочастотной составляющей в момент времени $t = t_H$ говорит о поглощении излучения за фронтом ударной волны, то есть о возникновении за фронтом ударной волны химической реакции взрывчатого разложения, еще не перешедшей в детонацию.

Подобного типа эксперименты с инертными веществами открыли возможность изучения их ударно-волновой сжимаемости, то есть параметров уравнений состояния, путем одновременно невозмущающего измерения волновых и массовых скоростей.

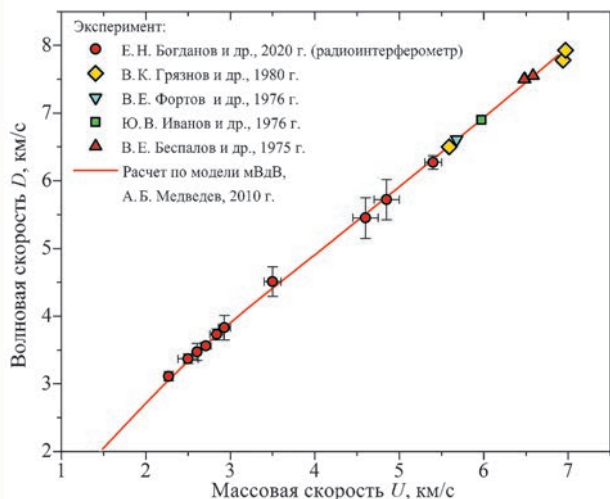
Вследствие высокой проводимости газов за фронтом мощных ударных волн возможна регистрация их движения, что демонстрирует следующий рисунок, на котором представлена ин-



Типичная интерферограмма (а), временные зависимости перемещения (б) и скорости (в) инициирующей ударной волны



Экспериментальная интерферограмма (а) и зависимости скоростей детонации в ВВ и ударной волны в воздухе от времени (б). t_1 – вход инициирующей ударной волны в ВВ, t_2 – инициирование детонации в ВВ, D_{DET} – скорость стационарной детонации, t_3 – выход детонационной волны в воздух, D_{SH} – скорость ударной волны в воздухе, t_4 – выход ударной волны из воздуха



Зависимость скорости ударной волны от массовой скорости на ударной адиабате аргона атмосферного давления

терферограмма опыта по расширению продуктов взрыва взрывчатого вещества в атмосферный воздух и зависимости скоростей детонационной волны в ВВ и ударной волны в воздухе от времени. Подобные эксперименты проводятся с целью определения параметров уравнений состояния ПВ, необходимых для расчетов конструкций. При использовании преград различной динамической жесткости можно получить различные давления в них и, соответственно, различные параметры состояний.

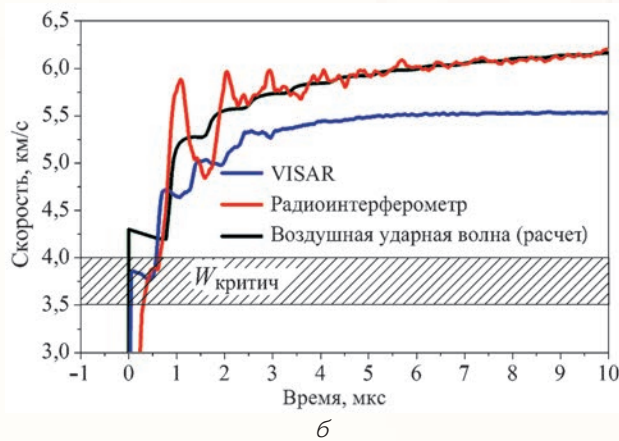
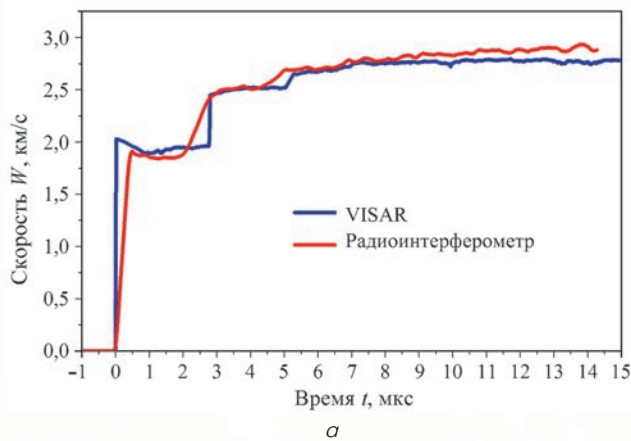
Возможность регистрации движения ионизирующих ударных волн в газах с помощью радиоинтерферометра используется для исследования их уравнений состояния в широкой области изменения параметров. На рисунке представлена в $D-U$ -переменных ударная адиабата аргона, изначально находившегося при атмосферном давлении и температуре около 20°C . Использование радиоинтерферометра позволило существенно расширить исследованный диапазон давлений на ударной адиабате аргона.

Но ионизация газов за фронтом ударных волн может быть помехой при определении скоростей объектов с помощью радиоинтерферометра, поскольку ударно-сжатый ионизованный газ экранирует зондирующее излучение. На очередном рисунке представлены некоторые результаты серии экспериментов по выявлению границ применимости метода для регистрации движения лайнеров в среде атмосферного воздуха. В диапазоне скоростей лайнера до 3 км/с наблюдается согласие между радиоинтерферометром и лазерным интерферометром по схеме VISAR. А при скоростях лайнера выше 4 км/с радиоинтерферометр регистрирует движение фронта воздушной ударной волны и осцилляции плазменного слоя.

В газах с менее интенсивной ионизацией за фронтом ударной волны порог зондирования движения отражающих радиоизлучение поверхностей соответственно будет выше. Для иллюстрации этого на рисунке приведены результаты эксперимента по регистрации движения металлического лайнера в среде гелия при атмосферном давлении. При скорости лайнера выше $\sim 5,2\text{ км}$ достигаются критические условия распространения радиоизлучения, и радиоинтерферометр начинает регистрировать движение ударной волны в гелии.

Слабая чувствительность метода микроволновой радиоинтерферометрии к параметрам естественной шероховатости отражающих поверхностей, лежащим обычно в диапазоне $\sim 1\text{--}100\text{ мкм}$, делает его неоценимым инструментом невозмущающей диагностики динамической реакции конструкций, особенно испытывающих взрывное нагружение. В качестве иллюстраций приведем результаты применения радиоинтерферометрии для диагностики реакции элементов силового герметизирующего корпуса взрыво локализирующих камер (ВЗК), предназначенных для протонной радиографии, при взрыве внутри них заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Наиболее уязвимым местом в герметичной ВЗК для протонной радиографии, помещаемых

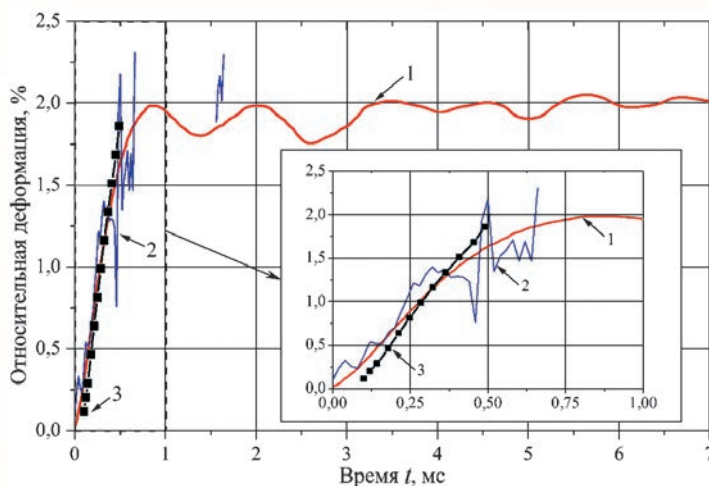


Результаты экспериментов по непрерывной регистрации движения металлических лайнеров в атмосферном воздухе

в протонный пучок (в тракт ионопровода протонного ускорителя), являются радиографические окна для ввода-вывода зондирующего излучения. Их «оптическая» толщина должна быть минимальной с целью уменьшения паразитного кулоновского рассеяния протонов и, вместе с тем, достаточной для гарантированного удержания продуктов взрыва внутри камеры.

На рисунке приведены результаты измерений колебательной реакции стенки корпуса в центральном сечении крупногабаритной ВЗК, сохранившей свою конструктивную целостность, при взрыве в ней около 50 кг ВВ в тротиловом эквиваленте. Измерения выполнялись тремя методами: скоростная фотохронография, тензоизмерения и микроволновая радиоинтерферометрия.

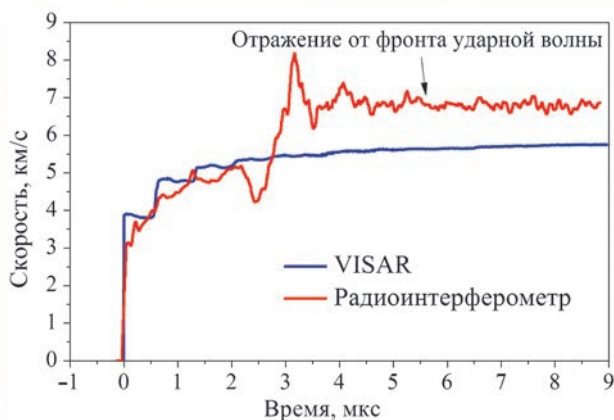
Полученные экспериментальные результаты демонстрируют, что с помощью микроволновой диагностики проведена непрерывная дистанционная регистрация колебания стенки корпуса в более длительном интервале времени



Зависимость относительной деформации стенки корпуса крупногабаритной ВЗК от времени. 1 – радиоинтерферометрия, 2 – тензометрия, 3 – фотохронография

по сравнению с традиционными методами регистрации.

Представленные выше результаты демонстрируют широкую применимость и высокую информативность исследований быстропротекающих процессов с использованием радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн. Благодаря своим достоинствам сегодня радиоинтерферометрический метод прочно завоевал свою нишу и активно используется во ВНИИЭФ при изучении ударно-волновых и детонационных процессов, динамики конструкций и высокоскоростного метания тел.



Регистрация движения металлического лайнера в среде гелия

БОГДАНОВ Евгений Николаевич – кандидат физико-математических наук, начальник отдела ИФВ, лауреат премии Правительства РФ

Экзотические ударные волны разрежения и их применение

И. В. ЗАНЕГИН, А. Л. МИХАЙЛОВ, И. В. ШИБЕРИН

Скорость распространения малых механических возмущений плотности и давления в сплошных средах (скорость звука) – величина не постоянная. Она зависит как от структуры вещества, так и от его термодинамического состояния (давление, плотность температура и т. п.).

У абсолютного большинства веществ взаимосвязь параметров уравнений состояния (УРС) такова, что с ростом давления, плотности и температуры растет и скорость звука.

(В твердых телах и в плазме существуют несколько видов скоростей звука, но мы на этих тонкостях останавливаться не будем, и будем говорить только о так называемой объемной скорости звука, определяемой сжимаемостью вещества – зависимостью плотности (или обратной величины – удельного объема) от давления).

Считается, что звуковые волны малой амплитуды изоэнтропийны – в них не происходит диссипации энергии и роста энтропии (меры неупорядоченности) вещества. Объемная скорость звука пропорциональна корню квадратному из производной от давления по плотности – величины, обратной сжимаемости, при постоянной энтропии.

(В реальности даже одномерные акустические импульсы любой амплитуды затухают во времени и пространстве – все же диссипация энергии, движение и рост энтропии вещества в них происходят).

Сжимаемость абсолютного большинства веществ нелинейно и монотонно уменьшается с ростом плотности, давления и температуры, так что первая производная от давления по плотности растет, а вторая производная – положительна. В графическом представлении соответствующая $P(\rho)$ или $P(v)$ кривая имеет вид «выпуклостью вниз». Соответственно растет скорость звука.

По этой причине акустические импульсы сжатия достаточно большой амплитуды, особенно с внешней «подпиткой», склонны по мере своего распространения к искажению формы, росту крутизны переднего фронта и превращению в ударную

волну (УВ) – поверхность резкого скачка термодинамических параметров и скорости движения вещества (массовой скорости) за фронтом. Мощность и длительность действия внешнего источника, источника энергии УВ, определяют ее амплитуду, скорость распространения (она сверхзвуковая) и длительность. УВ принципиально неизоэнтропийна – в ней вещество скачкообразно сжимается, приходит в движение, в нем происходит рост давления, температуры, внутренней энергии, энтропии. Ширина фронта УВ, т. е. скачка термодинамических параметров и массовой скорости, экстремально мала, определяется внутренней структурой вещества и не превышает нескольких межатомных расстояний. Под ударными волнами обычно понимают именно ударные волны сжатия.

Иное дело волны разрежения (ВР) – волны снижения давления. По той же причине – причине снижения скорости звука по мере падения плотности и давления (а при этом и температуры) в ВР все происходит наоборот – фронт исходной волны растягивается во времени и пространстве и становится все более пологим.

Наглядная аналогия (анalogии не являются доказательством, но позволяют представить себе явление) – набегающие на отмель волны на воде, столь любимые серфингистами, с крутым, в пределе «опрокидывающимся с перехлестом», передним (волна сжатия) и пологим задним



Открытие № 321. «Явление образования ударных волн разрежения»



Морские платформы

(волна разрежения) фронтами. Или дюны на песке – то же самое. Вспомним также знаменитые картины Хокусаи из цикла «36 видов Фудзи».

Вывод о невозможности существования ударных волн разрежения (УВР) в «обычных» веществах с упомянутой выше монотонной зависимостью плотности от давления сделал еще в 1904 г. французский ученый Жуге (E. Jouget).

Однако существуют вещества, а также области значений термодинамических параметров обычных «нормальных» веществ, когда существование УВР возможно. Условие этого – нарушение монотонности зависимости $P(\rho)$ – наличие участка кривой сжатия – разрежения,



Взрывной резак УВР-660 для реза трубы изнутри. Патент RU 2204689. Бронзовая медаль на Женевском салоне, 2008 г.

где вторая производная от давления по плотности (по удельному объему) отрицательна – участок (или участки) $P(\rho)$ выглядят «выпуклостью вверх». А это происходит в случаях фазовых или структурных превращений вещества, когда оно под действием внешнего давления переходит из одной фазы в другую, более сжимаемую; или происходит перестройка кристаллической решетки

твердого тела опять же в более легко сжимаемую структуру.

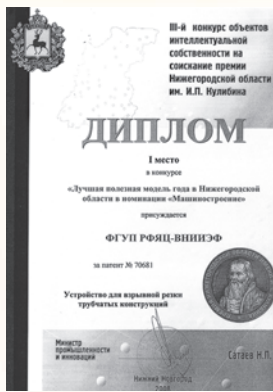
К таким веществам с несколькими типами кристаллической решетки относится ряд металлов и, прежде всего, железо – основа конструкционных сталей, из которых создано более 90 % всех металлоконструкций в мире. В 1956 г. американские ученые D. Bancroft, E. Peterson и S. Minshall обнаружили, что железо в ударных волнах сжатия амплитудой более 133 тысяч атмосфер (13,3 ГПа или 133 кбар) практически мгновенно перестраивает свою кубическую объемноцентрированную решетку (α -фаза) на неизвестную ранее плотноупакованную гексагональную (ϵ -фаза).

Вот здесь и возможно образование УВР при разгрузке ударно-сжатого железа, если амплитуда предшествующей УВ превышает 133 тысячи атмосфер. Амплитуда УВР (отрицательный скачок давления) зависит от превышения амплитудой УВ этих самых 133 кбар, а ширина фронта УВР, также как в случае УВ сжатия, определяется значением в несколько размеров параметра элементарной ячейки кристаллической решетки (порядка 10^{-7} см).

Разрушение (разрыв) материала при растяжении («откол») происходит под действием отрицательных (растягивающих) напряжений, если они превышают предел прочности материала. При импульсной нагрузке это происходит при встрече двух (и более) волн разрежения (ВР). Разрушение материала происходит по сильно шероховатой поверхности на дефектах структуры вследствие отмеченного выше растянутого во времени и пространстве плавного спада давления в ВР и по мере «включения» в процесс все новых дефектов. (Речь идет о временах микросекундного диапазона при обычных, плавных ВР).

При взаимодействии же двух и более УВР растягивающие напряжения достигаются практически мгновенно по сравнению с предыдущим случаем, за времена, определяемые шириной фронта УВР (порядка 10^{-8} с), а если амплитуда УВР достаточна, то разрыв материала («откол») происходит по существенно более гладкой поверхности, чем в случае обычных ВР. Площадь этой гладкой поверхности разрушения на несколько порядков меньше площади «обычной» шероховатой. А отсюда – работа образования гладкой поверхности разрыва сплошности материала также на несколько (2–3) порядков меньше обычно требуемой.

Правда, динамическая прочность материалов тоже не константа и растет, при прочих равных



условиях, по мере сокращения длительности действия растягивающих напряжений. Здесь объяснение то же: чем меньше время растяжения, тем меньшее количество дефектов структуры «задействуется» для разрушения материала. В итоге отношение работ, совершаемых при разрыве металла под действием обычных ВР и УВР, не столь велико, но все же составляет по крайней мере разы. Строгой количественной теории преимущества действия УВР до сих пор пока нет.

Амплитуда же растягивающих напряжений при встрече двух УВР достигает значения удвоенной амплитуды скачка разрежения и в случае (α - ϵ)-перехода в железе может составлять десятки килобар, в разы или даже на порядок превышающая динамическую прочность материала.

Именно этот эффект – образование «гладких» отколов в стали, обнаруженный в 1956 г. учеными ИФВ ВНИИЭФ (А. Г. Иванов, С. А. Новиков), и послужил экспериментальным обоснованием существования УВР. Возможность этого эффекта в веществах без прочности теоретически была предсказана Я. Б. Зельдовичем из термодинамических соображений в 1946 г., а экспериментально показана учеными из Института гидродинамики АН СССР в 1979 г. (Диплом № 321. «Явление образования ударных волн разрежения», 1987 г.).

Более подробно с физикой образования и примерами использования УВР по состоянию на 2000 г. читатель может познакомиться в монографии С. А. Новикова «Полезные взрывы» (изд. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2000 г.).

Мы же приведем здесь некоторые более поздние примеры.

Эффективность разрезания массивных стальных конструкций методом УВР представлена на фотографии, где с помощью тонкого (несколько миллиметров) слоя пластического взрывчатого вещества разрезан вдоль диаметральной плоско-

сти массивный цилиндр. Высота этого цилиндра на полтора порядка больше толщины ВВ.

Внешне это напоминает знакомую всем картину раскалывания полена топором, да и по сути похоже. Зона действия УВР (зона действия «лезвия топора») там, где амплитуда УВ от детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) превышала давление (α - ϵ)-перехода (напомним, что давле-

ние в детонационной волне современных бризантных ВВ превышает 300 кбар, а в ударной волне в стали, создаваемой при контактом взрыве этих ВВ, оно еще больше) выделяется (вверху) более гладкой поверхностью по сравнению с остальной зоной разрыва двух половин цилиндра. Роль УВР здесь, однако, свелась не только к созданию начальной магистральной «трещины» с гладкими стенками, но и к приданию разнонаправленных импульсов раскалываемым половинам цилиндра и его дальнейшему разрыву. Остальные довершили продукты взрыва (ПВ).

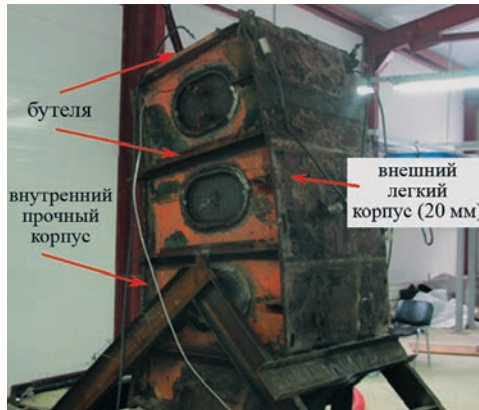
На следующем фото приведен пример поперечного разрезания фрагментов массивных опор (стальная труба диаметром 76 см с толщиной стенки 5,2 см) морских нефтяных платформ. Работа выполнялась по заказу транснациональной нефтяной компании Halliburton, США для демонстрации возможности демонтажа этим методом, требующим в разы меньшее количество ВВ (что важно для сохранения фауны), выводимых из эксплуатации платформ

в Мексиканском заливе. Отметим экономичность использования эне-



Взрывной резак ВР-762н для наружной резки

Устройства для демонтажа морских платформ



Фрагменты корпуса АПЛ

Внутренний прочный корпус (40 мм)



Разделение на 2 части



Результаты резки прочного корпуса АПЛ

гии ВВ – две половины фрагмента опоры на одном снимке не разбросаны в разные стороны и не разрушены вне линии разрезания.

Принципиальное отличие метода УВР от разрезания с помощью удлиненных кумулятивных (шнуровых) зарядов (УКЗ или ШКЗ) – другой механизм действия. В методе УКЗ разрезание идет путем перевода металла мишени в пластическое квазижидкое состояние и последующего его вытеснения (вымывания) из зоны действия кумулятивной струи. Глубина разрезания при этом металлов типа стали обычно не превосходит или близка к поперечному размеру (калибру) УКЗ (повторим: на первом фото толщина разрезанного цилиндра на полтора порядка больше толщины слоя ВВ).

В случае УВР механизм другой. Это – разрыв металла в узкой зоне шириной порядка ширины фронта УВР. Внешне это похоже и на раскалывание поленьев и в меньшей степени – на разрывание ткани после ее начального надреза. Это – тоже только наглядная аналогия.

Небольшая тонкость. Если мы после начального надреза металла в зоне УВР будем тут же сжимать (сближать), а не расталкивать образуемые фрагменты, то дальнейшее развитие магистральной «гладкой» трещины может остановиться – разрезание не произойдет (так же как если бы мы, надрезав ткань, перестали тянуть ее пополам в разные стороны). Доказательство этого: разрезание одних и тех же опор методом УВР снаружи (ПВ «сжимают» трубу) требует примерно вдвое больше ВВ, чем разрезание изнутри (ПВ растягивают трубу).

Ну и, наконец, на следующих фотографиях – разрезание комбинированным методом УВР+УКЗ фрагмента силового корпуса, изготовленного из высокопрочной стали, выведенной из эксплуатации атомной подводной лодки. Читатель может оценить изящество и «хирургическую» точность разреза. Так мы от рассуждений об акустике и об уравнениях состояния через ударные волны добрались до демонтажа крупногабаритных конструкций.

ЗАНЕГИН Игорь Владимирович –

кандидат технических наук, начальник отдела ИФВ,
лауреат премии Правительства РФ

МИХАЙЛОВ Анатолий Леонидович –

заместитель научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор технических наук, лауреат Государственной
премии и двух премий Правительства РФ

ШИБЕРИН Игорь Владимирович –

начальник лаборатории ИФВ

Взрывные генераторы давления для горнодобывающей промышленности

Е. В. БОТОВ, В. Н. ХВОРОСТИН

В строительных работах как в России, так и за рубежом используется природный облицовочный камень. В условиях ограниченного количества разработанных месторождений камня высокой декоративности есть потребность в ресурсосберегающих технологиях его добычи. Применяемые в наше время невзрывные методы обеспечивают сохранность камня при добыче и достаточную безопасность работ. Но низкая производительность и ограничение применения, связанные с прочностными свойствами пород, трудность работы по трещиноватым массивам, сложность разборки отколотого от массива блока усложняют применимость этих методов. Общими недостатками методов добычи блочного камня с использованием взрывчатых веществ является дробящее действие ударной волны на околошпуровой слой камня.

Для эффективной добычи строительного отделочного камня в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны специальные устройства – взрывные генераторы давления (ВГД). ВГД являются мощными импульсными источниками энергии многократного действия, использующими в качестве рабочего тела продукты взрыва (ПВ) промышленного взрывчатого вещества (ВВ), подрываемого в замкнутом объеме взрывной камеры. Особенностью применения ВГД является то, что подрыв заряда ВВ производится в камере, расположенной на поверхности, а в шпур поступают продукты взрыва под высоким давлением. В этом случае на горную породу действует сглаженное давление продуктов взрыва, при этом отсутствует бризантное действие, приводящее к образованию трещин в породе. Еще одной отличительной особенностью технологии ВГД от классических взрывных технологий является отсутствие ударной воздушной волны и разлетающихся осколков пород, которые способны нанести повреждения объектам, расположенным вблизи.

Основные принципы работы ВГД

Взрывные генераторы давления многократного действия являются источниками энергии с управляемыми параметрами (мощность импульса, длительность воздействия, фронт нарастания). Основные элементы ВГД: взрывная камера с размещенным в ней зарядом ВВ и глушитель ударных волн в виде полого штока-газовода с дроссельными отверстиями, служащего для им-

пульсной подачи ПВ в шпур. Взрывная камера обеспечивает локализацию ПВ и истечение их в заданном направлении. Глушитель ударных волн сглаживает пик давления на фронте и формирует ударный импульс с заданными параметрами. Остаточное давление в объеме ВГД зависит от плотности заряжания (отношение массы ВВ к объему полости ВГД) и коэффициента передачи энергии от ВВ к объекту.

В рабочем цикле ВГД можно выделить три основные стадии: сначала происходит детонация заряда ВВ, затем образовавшиеся ПВ, расширяясь, заполняют весь объем взрывной камеры, и, наконец, остаточное давление газа совершает необходимую работу. Контакт продуктов взрыва с поверхностью раскалываемой породы происходит в шпурах посредством специальных дроссельных систем (газоводов). В зависимости от размера отделяемого блока и прочности породы устанавливается определенное количество ВГД, ориентированных вдоль направления раскалывания.

Управляемыми параметрами процесса фрагментации массива (или блока) являются количество шпуров, расстояние между ними, характеристики самого ВГД и распределения во времени срабатывания отдельных зарядов. Не управляемыми, но важными параметрами, определяющими процесс фрагментации, являются характеристики раскалываемого материала.

Конструкции ВГД

Для выкалывания монолита из массива применяется ВГД с газоводом, имеющим диаметр, равный диаметру шпура. При срабатывании ВГД продукты взрыва заполняют весь объем шпура от торца газовода до дна шпура. Для исключения выталкивания ВГД из устья шпура в момент его работы в газоводе предусмотрен узел фиксации его в шпуре. ВГД в шпуре закрепляется перемещением к стенкам шпура с помощью специального ключа клиньев, установленных в пазах газовода. Конструкция пазов и клиньев выполнена таким образом, что исключается выпадение клиньев из газовода после разрушения шпура. При отказе или при отмене подрыва для изъятия ВГД из шпура узлы его фиксации переводятся в исходное положение.

Для пассировки (предварительной обработки каменного блока с целью придания ему задан-



а



б

ВГД со специальным ключом (а) и газоввод с узлом фиксации клинового типа (б)

ных размеров и формы) разработан ВГД с другой конструкцией газоввода. Истечение газов происходит по нормали к стенкам шпура и давление создается в щелевом пространстве между стенкой шпура и корпусом газоввода на длине шпура, ограниченной уплотнениями. Количество отверстий для выхода газов из газоввода и их суммарная площадь поперечного сечения определяет степень дросселирования потока и растягивания во времени импульса давления в шпуре.

На рисунке для примера представлены экспериментальные данные изменения давления в шпуре в зависимости от плотности заряжения при одинаковой степени дросселирования и расчетная зависимость одного из эксперимента (на рисунке изображена пунктирной линией).

Для оценки и сопоставления этих данных с методикой отбойки блоков с помощью детонирующего шнура (ДШ) проведены измерения профиля давления, действующего на стенки шпура при подрыве в нем одной и двух нитей ДШ. На рисунке представлена сравнительная диаграмма изменения давления в шпуре при подрыве двух нитей ДШ и при работе ВГД.



ВГД для пассивовки



Вид газоввода для пассивовки с узлом фиксации клинового типа

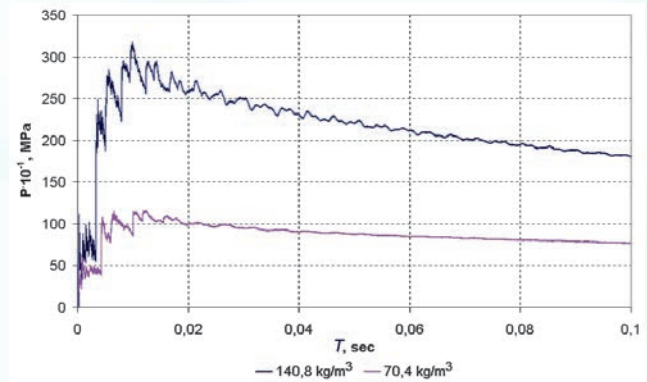
Работа ВГД в отличие от ДШ обладает рядом преимуществ:

- отсутствуют ударные волны большой интенсивности;
- амплитуда квазистатического давления и длительность воздействия продуктов взрыва на стенки

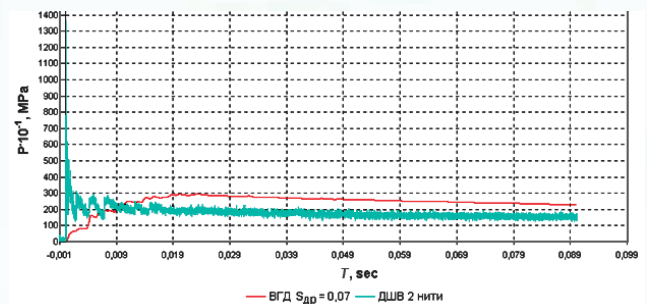
шпура больше, что позволяет помимо образования магистральной трещины отодвинуть откалываемый блок от монолита на некоторое расстояние.

Результаты испытаний ВГД на промышленном карьере

Испытания проводились на карьере ЗАО ПО «ВОЗРОЖДЕНИЕ» (г. Выборг Ленинградской области). Полезная толща сложена гранитом, представляющим собой высокопрочную трещиноватую породу массивной структуры (средняя плотность 2,673 т/м³, пористость 1,6 %, предел прочности на сжатие 181,4 МПа, сопротивляемость к удару 71 см, истираемость на круге 0,38 г/см²). Испытания ВГД проводились на гранитных блоках различной геометрии с варьированием шага бурения, массы заряда ВГД, ви-



Осциллограммы изменения давления в шпуре в зависимости от плотности заряжения



Сравнение работы в шпуре ДШ и ВГД

да и длины газоввода. Ниже приведены фоторезультаты двух испытаний.

На первом фото приведена кинограмма одного из опытов и результаты направленного раскалывания гранитного блока размером $2100 \times 2400 \times 2200$ мм, массой 30 т. Поверхность раскола представляет собой гладкую ровную поверхность и удовлетворяет требованиям к внешнему виду и качеству поверхности блоков. В результате опыта часть расколотого блока отбросило на расстояние ~2 м.

Далее приведены результаты раскола блока размером $1650 \times 2400 \times 2400$ мм, массой 25 т. При уменьшении плотности заряжания и увеличении расстояния между шпурами произошло образование магистральной трещины без отбрасывания расколотых блоков.

Для каждого конкретного месторождения необходимо проведение калибровочных опытов с целью нахождения эмпирического коэффициента для расчета оптимального заряда.



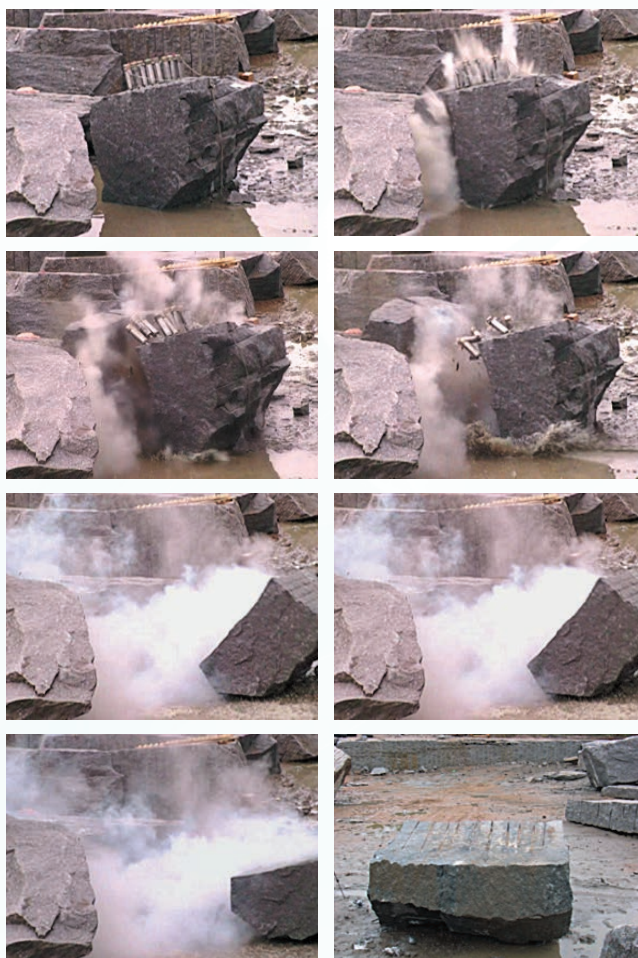
Результаты раскола блока

Вывод: возможность применения взрывных генераторов давления для добычи блочного камня, при этом отличительными моментами являются:

- удобство заряжания шпура;
- отсутствие наведенной микротрещиноватости;
- уменьшение объема буровых работ по сравнению, например, с гидроклиновым методом при пассивровке;
- отсутствие ударной воздушной волны и разлетающихся осколков пород, которые способны нанести повреждения объектам, расположенным вблизи работы ВГД.

За разработку взрывных генераторов давления получены:

- золотая медаль на «Международном салоне изобретений, новых технологий и продукции «Женева-2009», Швейцария, г. Женева;
- диплом в конкурсе «Лучшая полезная модель года в Нижегородской области в номинации «Машиностроение».



Кинограмма опыта и результаты раскола



БОТОВ Евгений Вячеславович –
начальник отдела ИФВ

ХВОРОСТИН Владимир Николаевич –
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
ИФВ, лауреат двух премий Правительства РФ

Асимптотическая кинетика образования объектов, проявляющих квантовые свойства

Э. Э. ЛИН

Per aspera ad astra

Введение

В исследованиях микромира, нано- и мезоструктур, астрофизических и космологических объектов существует ряд специфических проблем, связанных с определением пространственной границы между макро- и микромирами (макрофизикой и микрофизикой), а также с определением границ однородности распределения материи в космосе. Разработан асимптотический метод кинетики образования объектов различной физической природы, проявляющих квантовые свойства в различных пространственных масштабах. Метод основан на расширенной трактовке соотношений неопределенности Гейзенберга и абсолютной определенности Эффрея в пространстве размеров объектов (кластеров) и на кинетических представлениях о росте кластеров из малых зародышей в процессах приближения к равновесию.

Известно, что квантовая механика основана на понятиях о комплексной волновой функции, о плотности состояний и на соответствующем математическом аппарате, использующем законы преобразований комплексных многообразий. Это позволило получить точные решения ряда принципиально важных задач и создать современную стандартную модель физики микромира. Вместе с тем оказалось, что для приближенного рассмотрения асимптотики образования объектов, проявляющих квантовые свойства, вполне достаточно применения понятия действительной функции плотности распределения в пространстве размеров кластеров и исследования ее свойств с помощью линеаризации стохастического уравнения Фоккера – Планка.

Предложенные модели, в которых отсутствуют подгоночные параметры, могут оказаться полезными при первом знакомстве с той или иной задачей, при проведении оценок и первичном анализе результатов экспериментов. Все выведенные аналитические выражения для пространственно-временных характеристик рассматриваемых процессов приближения к равновесию включают в себя только фундаментальные физические константы и физические характеристики вещества, а также общеизвестные фено-

менологические параметры объектов – размеры и массы зародышей.

1. Примеры применения понятия неопределенности

1.1. Была определена величина фундаментальной массы в микромире, равная 196 ГэВ. Эта величина соответствует известной массе частиц темной материи, равной 192 ГэВ, а также приблизительно соответствует известной теоретической верхней оценке в 170 ГэВ массы бозона Хиггса.

С единой точки зрения рассмотрены разнообразные ядерные явления как процессы образования и роста компактных кластеров с выраженными коллективными квантовыми свойствами (сильное взаимодействие) в замкнутой стохастической системе нуклонов, находящейся в возбужденном состоянии. В начальный момент времени такая система состоит из зародышей ядерной материи: альфа-частиц и (или) их фрагментов – тритонов и дейтронов. В результате случайного взаимодействия этих зародышей происходит их коалесценция: в системе образуются компактные скопления ядерной сплошной среды – кластеры. Колебания нуклонов на поверхности соприкасающихся «ядерных» кластеров с временно (виртуально) разорванными внешними связями могут приводить к взаимной компенсации этих незадействованных связей. В результате происходит консолидация соприкасающихся кластеров и образование более крупных объектов ядерной среды с различными массами (массовыми числами A).

Предложенная модель позволила определить массовые числа стабильных ядер во всем диапазоне, включая трансфермиевые элементы (рис. 1), и дать адекватные оценки массовых характеристик типичных процессов приближения к равновесию: кластерной радиоактивности, спонтанного деления, нуклеосинтеза в звездах тяжелых и сверхтяжелых элементов. Описана асимптотика образования сверхтяжелых ядер, рассчитаны их среднее и конечное массовые числа в звездах: $\langle A \rangle \approx 330$ и $A_{end} \approx 470$.

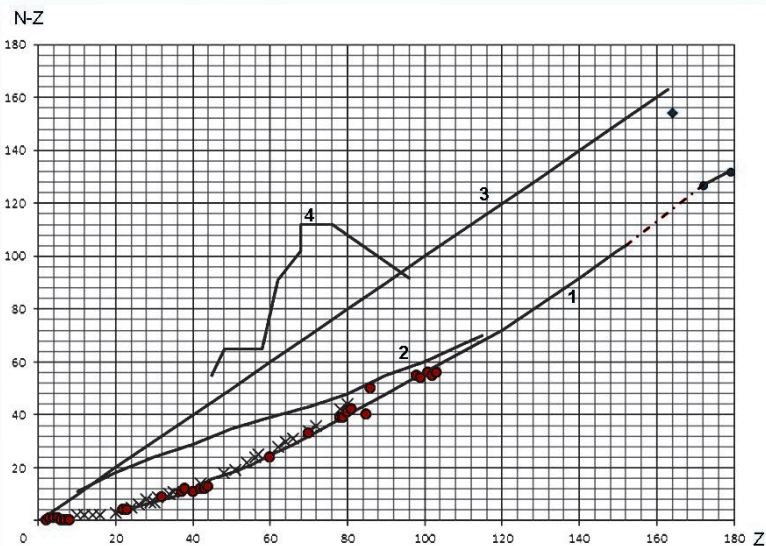


Рис. 1. Диаграмма нейтроноизбыточных ядер: 1 – параболическая линия стабильности по Селинову; 2 – граница известных нейтроноизбыточных ядер; 3 – предполагаемая граница существования нейтроноизбыточных ядер; 4 – граница нейтронной стабильности по отношению к испусканию (захвату) одного нейтрона по Гридневу и другим; ● – элементы; × – стабильные изотопы; ◆ – «остров стабильности», упоминаемый Селиновым $Z = 164, N = 318$; ● – конечные ядра $Z = 172, N = 299$ и $Z = 179, N = 311$

1.2. В области мезоскопии удалось объяснить и описать все известные данные по динамическому и статическому синтезу алмазов из различных твердых форм углерода, а также известные данные по образованию природных алмазов.

Предложена кластерная модель прямого синтеза объемных белковых наночастиц в системе, предварительно состоящей из молекул аминокислот с добавками нуклеиновых кислот. Соотношение неопределенностей «координата–импульс» допускает возможность образования белковых наночастиц без стадии образования полипептидных наноцепей. Предложенная модель формально дает расчетные размеры глобулярных биологических наночастиц и мезообъектов, соответствующие размерам некоторых белков и ферментов, клеток, а также органелл (рис. 2).

Результаты, полученные в формате неопределенности в пространстве размеров объектов, указывают на возможность случайного образования в системе из молекул аминокислот квазикристаллических наночастиц и мезообъектов, соответствующих по размерам жизненно важным белкам и клеткам. Эти «неправильные» (мутационные) объекты могут вырастать на тех или иных центрах кристаллизации без образования полипептидных связей, т. е. без формирования

«правильного» биологического кода. При этом возможно образование и рост подобных наночастиц и мезообъектов на фрагментах разрушенных белков и клеток, как на центрах кристаллизации. Все это находится в соответствии с общеизвестными представлениями о мутациях биологических объектов на молекулярном уровне.

Что касается общеизвестных представлений о возможности происхождения жизни на Земле после занесения на нее аминокислот из космоса, то в формате неопределенности показано, что из обломков аминокислот, образовавшихся при ударах метеоритов о земную поверхность, могут образоваться объекты с размерами от 30–45 нм (рибосомы, внутри которых происходит биосинтез белков) до 0,4 мкм (простейшие организмы – наноархеоты).

1.3. Применительно к астрофизике и космологии предпринята попытка аналитического определения характерных размеров нейтронных звезд, шаровых скоплений красных гигантов, сверхскоплений галактик и Вселенной. Кроме того, рассмотрен вопрос о границах космического пространства.

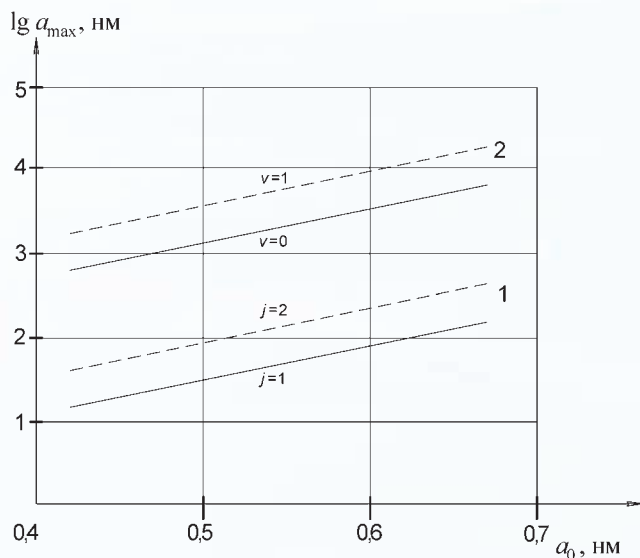


Рис. 2. Расчетные зависимости максимальных размеров a_{max} биологических наночастиц и мезообъектов от размеров a_0 зародышей – молекул аминокислот: 1 – вращательные уровни, $j = 1$ – основное состояние, $j = 2$ – первое возбужденное состояние; 2 – колебательные уровни, $v = 0$ – основное состояние, $v = 1$ – первое возбужденное состояние

С этими целями рассмотрена аналогия между квантовой механикой, астрофизикой и космологией (см. табл. 1). В космических структурах можно выделить области сравнительно малых масштабов, в которых в результате действия гравитации распределение массы является неоднородным – аналогия с дискретным спектром энергии в квантовой механике. В более протяженных структурах, где действие гравитации «размазывается» в пространстве, распределение массы становится квазиоднородным – аналогия с непрерывным спектром энергии. Такая аналогия создает предпосылку для попытки распространить понятие неопределенности на космические масштабы.

Таблица 1

Аналогия «квантовая механика ↔ астрофизика и космология»

Квантовая механика	Астрофизика и космология
Дискретный спектр энергии	Неоднородное распределение массы
Непрерывный спектр энергии	Квазиоднородное распределение массы

Исходя из предложенных соотношений неопределенностей, аналитическим путем рассчитаны времена образования 0,17–17 с и характерный размер 15,6 км нейтронных звезд при взрывах сверхновых. Эти результаты соответствуют общеизвестным представлениям.

Суть предложенного понятия неопределенности в космологических масштабах заключается в том, что в течение промежутка времени элементарного единичного акта гравитационного взаимодействия рассматриваемых структур их размеры не могут быть точно определены. Это связано с тем, что нельзя определить, к какой из соседствующих структур относятся входящие в них поверхностные элементы, наиболее близко расположенные друг к другу. Для шаровых скоплений элементами являются звезды-гиганты, для сверхскоплений – галактики, для Вселенной – скопления галактик.

Определена феноменологическая константа действия в космологических масштабах, связанная с критической плотностью вещества, выше которой Вселенная становится замкнутой, скоростью света в вакууме и с размером зародышей, из которых формируется космологический объект. Полученные асимптотические зависимости размеров рассматриваемых объектов от вре-

мени находятся в соответствии с консенсусом о характере расширения Вселенной и Космологическим принципом и создают возможность определения границ областей квазиоднородного распределения материи в космосе. Расчетный характерный диаметр шаровых скоплений равен $6 \cdot 10^{18}$ м \approx 200 парсек (630 световых лет), что соответствует общеизвестным данным. Расчетный характерный размер сверхскоплений в момент времени $t_1 = 10^{10}$ лет внедрения во Вселенную темной материи приблизительно равен $2,59 \cdot 10^{24}$ м \approx 84 Мегапарсек (Мпк). Наблюдаемые размеры сверхскоплений лежат в диапазоне 30–100 Мпк. Найденную величину можно принять за «нижний» размер, начиная с которого распределение массы вещества во Вселенной становится квазиоднородным. Приняв эту величину за размер зародыша более крупной однородной изотропной структуры, можно вычислить, что расчетный характерный размер Вселенной в момент времени внедрения темной материи приблизительно равен $1,96 \cdot 10^{25}$ м \approx 640 Мпк. Можно полагать, что верхняя граница однородности распределения материи во Вселенной (радиус Вселенной) была приблизительно равна $R_{un} \approx 0,98 \cdot 10^{25}$ м \approx 320 Мпк. Найденный размер значительно меньше «светового» радиуса на тот момент времени $R_{light} = 9,45 \cdot 10^{25}$ м \approx 3060 Мпк. Это означает возможность последующего взаимодействия группы вселенных, расположенных в области с размером светового радиуса.

Получено выражение, описывающее ускоренное расширение Вселенной в настоящую эпоху из-за влияния темной материи. В частности, аналитическим путем выведен закон Хаббла. Размер Вселенной составляет $\langle a \rangle \approx 2,76 \cdot 10^{25}$ м \approx 900 Мпк. Эта величина меньше современного светового радиуса, равного $R_{light} = 13,23 \cdot 10^{25}$ м \approx 4290 Мпк, что создает возможность взаимодействия группы «близко расположенных» вселенных в области с размером светового радиуса.

2. Примеры применения понятия абсолютной определенности

2.1. Одной из наиболее актуальных проблем фундаментальной физики является описание адронов со всеми их свойствами на основе первых принципов, т. е. в терминах взаимодействующих кварков и глюонов, входящих в состав адрона. На основе соотношения, связывающего точные координату и импульс в пространстве размеров объектов, а также закона сохранения массы в элементарном процессе захвата класте-

ром «малого» зародыша, аналитически выведено выражение для конечного размера объекта. Получено, что размер адрона, образующегося из легких u - и d -кварков в состоянии конфайнмента (т. е. подвергнутых сильному взаимодействию с масштабом времени 10^{-23} с), когда их масса покоя равна 330 МэВ, равен $a_{hadr} \approx 1,64$ Фм. Эта величина находится в хорошем соответствии с зарядовым диаметром протона 1,72 Фм. Таким образом, исходя из массовой характеристики условно точечной частицы – кварка – можно получить пространственную характеристику нуклона.

2.2. В области мезоскопии, исходя из выведенного закона роста объектов в формате абсолютной определенности, рассчитан характерный размер 0,1 мм частиц алмазов типа карбонадо, образовавшихся за время жизни Земли.

2.3. В области астрофизики и космологии рассчитаны размер 4000 км астрофизических объектов, соответствующий размеру карликовых звезд, а также размер сверхскоплений галактик, равный 36 Мпк. Эти результаты соответствуют данным наблюдений.

3. Некоторые гипотетические объекты

Установленное соответствие полученных результатов с общепринятыми представлениями дает основание для попытки рассмотреть возможности образований гипотетических объектов.

В формате неопределенности рассчитан конечный нуклид с массовым числом вблизи 470 (рис. 1).

В формате абсолютной определенности предсказано образование в звездах гигантских ядер с размерами порядка 10^{-12} м, внутри которых под действием мюонного антинейтрино происходит реакция распада протона на нейтрон и положительно заряженный мюон. Установленная аналогия между сильным взаимодействием нуклонов внутри обычных ядер, передаваемым пионами, и предполагаемым взаимодействием внутри гипотетических гигантских ядер, передаваемым мюонными антинейтрино, свидетельствует в пользу возможности существования предсказываемых гигантских ядер.

Заключение

Предложенный феноменологический подход позволяет получать оценки асимптотических характеристик образования субъядерных частиц и ядер, кристаллических наночастиц и мезообъектов, астрофизических и космологических объ-

ектов. Понятия неопределенности и абсолютной определенности взаимно дополняют друг друга и позволяют рассмотреть возможность образования гипотетических объектов. Например, в формате абсолютной определенности рассматриваются биологические мезообъекты с размерами до ≈ 140 мкм, образовавшиеся за время жизни Земли. Это могут быть кристаллические скелеты микроорганизмов (бактерий), находящиеся в труднодоступных местах (ледники, пещеры, потухшие вулканы, глубоководье и т. п.). Близкие размеры могут иметь кремнийорганические мезообъекты, основой которых является силосан. Элементарный участок такой полимерной цепи каучука состоит из двух соседних атомов Si и присоединенных к ним атомов С, Н, О. Замещение некоторых атомов Н атомами N, P, S, Fe и т. д. приводит к аналогии с биологическими полипептидными наночепями. Такая аналогия расширяет круг вопросов изучения жизни как наномасштабного феномена. В формате неопределенности показана возможность образования из силосана глобулярных объектов с размерами 0,06 и 4 мкм (аналоги рибосом и архей).

Разработанная концепция не противоречит общеизвестной теории Чена стохастического квантового пространства в космологии, а также представлениям Рязанцева о больших числах в квантованной Вселенной. В формате неопределенности показана возможность существования множества независимых групп вселенных в космической сфере с размером $\sim 9 \cdot 10^{27}$ м, значительно превышающим современный световой радиус $\sim 10^{26}$ м. Эти объекты не рассматриваются в существующих стандартных моделях, описанных в работах Лукаша с соавторами. Можно отметить также, что указанный выше размер (диаметр) космической сферы приблизительно соответствует величине космического радиуса $5,89 \cdot 10^{27}$ м, вычисленного ранее в работе Бартини на основе соотношений между физическими константами.

ЛИН Эмиль Эдипович –

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ

Эффекты множественного соударения

З. В. ТАНАКОВ, Э. Э. ЛИН

Одной из задач механики деформируемых сред является исследование процессов высокоскоростного соударения группы тел с преградой. Как в экспериментальном, так и в теоретическом плане этой проблеме до сих пор уделялось мало внимания. Такое положение связано со сложностью процесса множественного удара для физического и математического моделирования. На практике сложно реализовать управляемое метание группы тел с требуемым распределением скоростей, расстоянием между ними по фронту и глубине группы. Для адекватного численного моделирования требуется проведение расчетов в трехмерной постановке, что сдерживается сложностью численных моделей, методик и требует высокой производительности вычислительной техники.

С целью хоть отчасти восполнить существующий на сегодняшний день пробел в исследовании множественного воздействия макроскопических ударников на однородные преграды нами была предпринята попытка получить экспериментальные данные по синхронному и асинхронному множественному воздействию макроскопических металлических ударников с характерными размерами 3–8 мм на преграды из различных сплавов алюминия при скоростях соударения от 250 до 1300 м/с.

Экспериментальные исследования

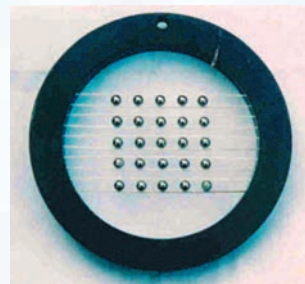
На начальной стадии исследований по воздействию множества макроскопических ударников на преграды, применялся способ разгона группы стальных сферических ударников расширяющимися в вакуумированный канал ударной трубы продуктами взрыва заряда ВВ. Внешний вид устройства и блока с 25 сферическими стальными ударниками – шариками диаметром $d = 5$ мм, который размещался внутри ударной трубы, показан на рисунке. Схема проведения экспериментов позволяла осуществлять



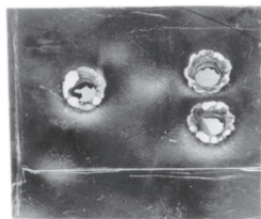
Специализированное устройство (ударная труба) в сборе перед опытом

регистрацию положения ударников в потоке продуктов взрыва внутри диффузора с помощью импульсной рентгеновской установки (ИРУ).

В качестве преград в опытах использовались пластины из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 15 мм и толстые «полубесконечные» преграды из сплава алюминия Д16 диаметром $D_m = 120$ мм и толщиной $H = 100$ мм. Средняя скорость соударений лидирующей компактной группы сферических ударников из стали марки ШХ15 диаметром 5 мм с дюралюминиевыми преградами составила $\langle V \rangle = 1200\text{--}1400$ м/с.



Блок с ударниками

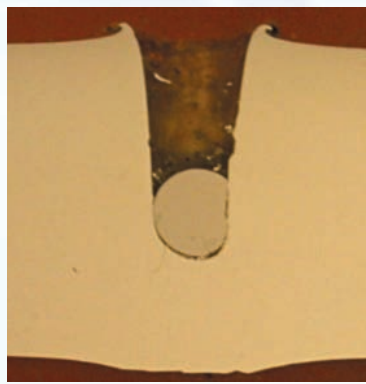


Фотография фрагмента пластины. Сквозное пробитие пластины группой лидирующих шариков

При этих условиях множественного удара стальных шариков по дюралюминиевой преграде толщиной 15 мм происходило их сквозное пробитие несколькими ударниками. Одиноч-



а



б

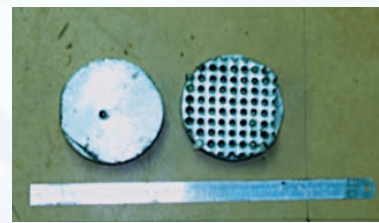
Сечение одного из кратеров с шариком после множественного удара лидирующей группы со скоростью 1300 м/с (а). Сечение кратера с шариком после одиночного удара со скоростью 1300 м/с (б)

ный ударник при аналогичной скорости соударения мишень не пробивал.

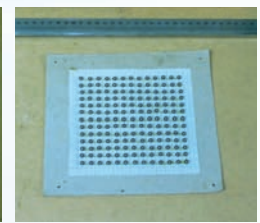
При соударении же множества стальных шариков с толстыми («полубесконечными») преградами, происходило проникание ударников на относительные глубины $z_{\text{мн}}/d = 2,8-4,1$ (где z – глубина проникания, d – диаметр ударника), что в среднем в 1,6 раз превышало глубину проникания $z_{\text{од}}/d = 2,2$ при одиночном ударе.

Невозможность создания в такой постановке экспериментов однородного в пространстве потока ударников и, соответственно, их управляемого синхронного соударения с преградой значительно усложняет численное моделирование данных экспериментов. Для устранения этого недостатка были разработаны схемы проведения экспериментов с применением взрывных ударных стенов (ВУС) типа «Ствол», используемых в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В этой постановке преграда разгонялась продуктами взрыва бризантного ВВ и, пролетая сквозь мишенную камеру, соударялась с блоком с ударниками, а затем тормозилась в уловителе. Ударники располагались в виде сетки с шагом расположения $a = 2d$, где d – диаметр



а



б

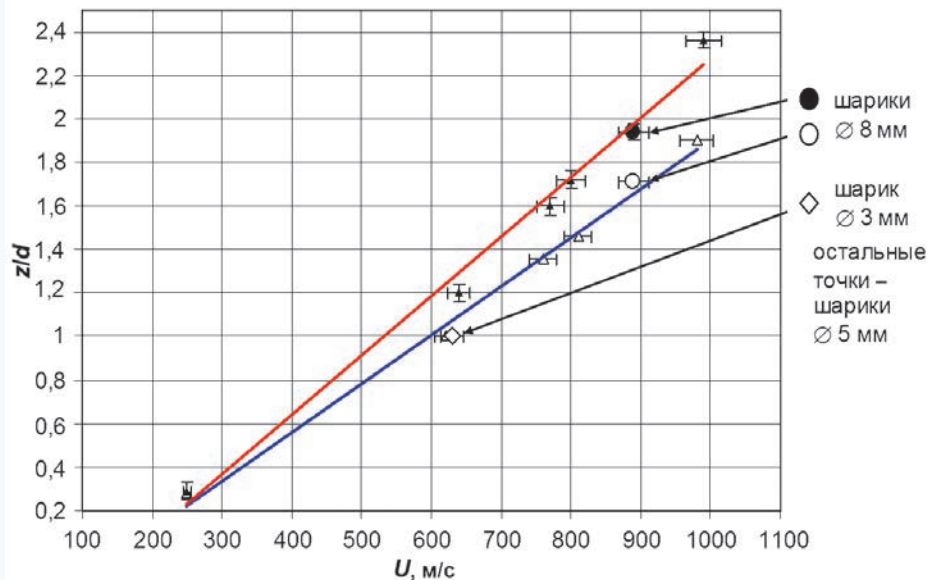
Характерный вид преград после одиночного и множественного воздействия (а) и блок со сферическими ударниками (б)

ударника (шарик или цилиндр). На рисунке показан внешний вид преграды после соударения с одиночным и множеством ударников и блок с ударниками.

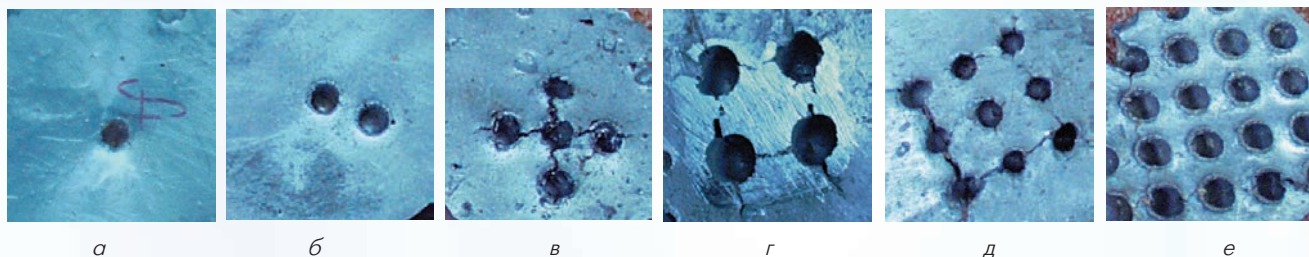
На рисунке в качестве примера показана зависимость относительной глубины проникания от скорости соударения для одного из сочетаний материалов ударника и преграды.

В проведенной серии экспериментов величина отношения средней относительной глубины проникания при множественном синхронном соударении к относительной глубине проникания одиночного ударника $\langle z_{\text{мн}} \rangle / z_{\text{од}}$ находилась в пределах от 1,04 до 1,36 при скорости соударения от 250 м/с до 1250 м/с для различного сочетания материала ударников и преграды.

В дальнейшем авторами были проведены эксперименты по исследованию эффективности множественного воздействия в зависимости от шага расположения ударников и их количества. Было установлено: 1) увеличение шага



Зависимость относительной глубины проникания от скорости соударения для сочетания материалов ударника и преграды ШХ15/Д16: синяя сплошная линия – одиночный ударник; красная сплошная линия – множественное воздействие



Внешний вид центральных частей преград после соударения: а – одиночный ударник; б – два ударника; в – пять ударников; г – четыре ударника; д – девять ударников; е – множество ударников

расположения ударников приводит к уменьшению эффективности множественного воздействия и при шаге $\geq 3d$ эффект множественного воздействия исчезает при данных условиях нагружения; 2) при «сеточном» расположении ударников с шагом $a = 2d$ минимальное количество ударников, при котором достигается максимальная эффективность множественного воздействия, при данных условиях нагружения, составляет 9 шт.

Металлографические исследования

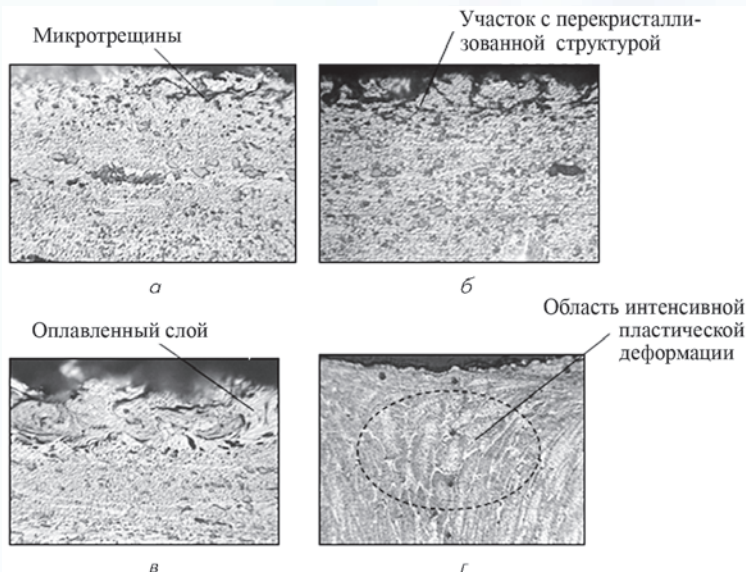
Для определения механизма разрушения преград важно иметь информацию о функции распределения параметров, характеризующих проникание ударников в преграды. Такую информацию получали с помощью металлографического анализа при исследовании сохраненных после опытов образцов «полубесконечных» преград.

Оказалось, что в диапазоне скоростей соударений от 250 до 1300 м/с как на стенках кратеров, так и под ними происходит заметное увеличение микротвердости материала на глубины до 2 мм, далее происходит постепенное уменьшение микротвердости до величины, характерной для основного, не подвергшегося нагрузке, материала. В случае соударений со скоростью 800 м/с и более в образцах преград на стенках кратера видны следы плавления и участки с перекристаллизованной структурой.

На стенках кратеров образуются микротрещины, идущие вглубь материала преград. В случае множественного воздействия они имеют выраженный характер и достигают длины до 100 мкм (при одиночном воздействии длина микротрещин до 40 мкм). Наличие зон плавления на стенках кратеров свидетельствует о возможности адсорбционной потери прочности материала на гра-

нице твердой и жидкой фаз. При наличии растягивающих напряжений, создаваемых соседними ударниками при множественном воздействии, это приводит к более выраженному образованию микротрещин и к более глубокому прониканию ударников в преграду, чем при одиночном воздействии.

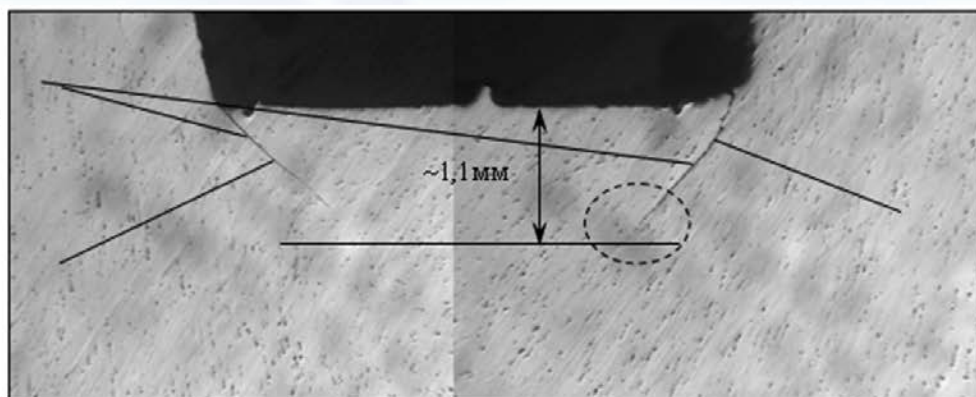
Результаты постопытного электронно-микроскопического анализа образцов мишеней после одиночного и множественного соударения со скоростью 1250–1300 м/с свидетельствуют о том, что при множественном воздействии ударников из вольфрама и стали на преграды из алюминиевых сплавов АМг6 и Д16 микроструктура материала претерпевает значительные изменения. В слоях, непосредственно прилегающих к стенкам кратеров в обоих сплавах, и на дне кратеров в образцах из Д16 произошла первичная рекристаллизация. Зафиксированные по границам зерен в пористых слоях выделения



Микроструктура образца преграды, увеличение $\times 1000$. Скорость соударения 800 м/с: а, б – боковые стенки кратера недалеко от поверхности воздействия; в – стенки кратера в донной части кратера; г – под донной частью кратера

Трещины
в полосах
сдвига

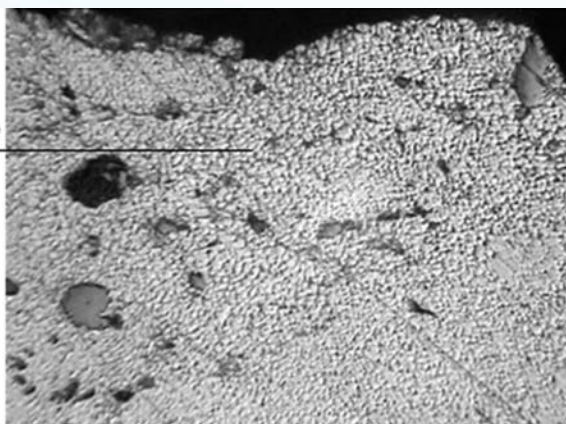
Длина
трещины
~1,3 мм



Длина
трещины
~1,68 мм

Микроструктура преграды в донной части кратера (увеличение $\times 25$), скорость соударения 1250 м/с

Рекристаллизованные
зерна α -твердого
раствора на основе
алюминия



Микроструктура образца в донной части кратера, увеличение $\times 1000$, скорость соударения 1250 м/с

тяжелых элементов свидетельствуют в пользу правомерности предположения о том, что наличие нерастворимых примесей в металле с высокой энергией дефектов упаковки затормаживает протекание процесса динамического возврата и тем самым способствует развитию динамической рекристаллизации.

Заключение

В результате проведенных экспериментов установлено, что при асинхронном и синхронном множественных воздействиях стальных ударников на преграды из алюминиевых сплавов происходит увеличение средней относительной глубины проникания ударников до 60 % по сравнению с глубиной проникания одиночного ударника при скоростях соударения до $V = 1300$ м/с. При «сеточном» расположении стальных ударников с шагом сетки $a = 2d$, для достижения наибольшей эффективности множественного воздействия (глубины проникания ударников) необходимо, чтобы их количество было не менее 9 шт. Увеличение шага сетки

более $a \geq 3d$ приводило к тому, что эффект множественного воздействия не наблюдался. Объяснение полученных результатов лежит в локальном разупрочнении материала преграды за счет растягивающих напряжений, возникающих в результате интерференции волн сжатия-разгрузки, создаваемых соседними ударниками, что приводит к более глубокому прониканию ударников в случае множественного воздействия.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам лаборатории 0340-06 ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ и лично бывшему начальнику лаборатории, в настоящее время советнику директору ИФВ, Владимиру Николаевичу Хворостину, заместителю научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктору технических наук Анатолию Леонидовичу Михайлову за поддержку данного направления исследований и приглашают заинтересованных ученых к взаимовыгодному сотрудничеству, будь то эксперименты или численное моделирование.

ТАНАКОВ Захар Валерьевич –

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ

ЛИН Эмиль Эдипович –

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИФВ

«И как стала вершина возносит ввысь имя русского академика...»

М. А. ВЛАСОВА, АН. А. ДЕМИДОВ

Физическая культура и спорт – это активный отдых и хороший способ восстановления работоспособности. Но еще лучше, когда такой отдых совмещается с познавательной деятельностью. В ИФВ активное развитие получило спортивно-патриотическое направление. Суть его заключается в том, что физическая активность совмещается с интересом к жизни и деятельности выдающихся ученых и организаторов Атомного проекта СССР. Нашей традицией стала установка памятных досок в горах и ущельях, связанных с их именами.

*Не Ялта здесь вам, и не Сочи,
Не южных морей солнцедар.
Здесь скалами нервы щекочет
Хребет под названьем Кодар*
А. Милов

Историко-патриотическая составляющая в спортивных группах туристов и альпинистов города зародилась с попытки разобраться с загадочным появлением на «объекте» в начале 1950-х гг. сразу трех заслуженных мастеров спорта по альпинизму: Л. Я. Пахарьковой, С. И. Ходакевича и А. В. Багрова, которые стали организаторами секции альпинизма города. Было выяснено, что они направлены на наш «объект» после выполнения правительственного задания, связанного с промышленной разведкой ме-

сторождения урановой руды в 1949–1950 гг. в Мраморном ущелье на Кодаре.

Была проведена большая исследовательская работа с целью уточнения состава группы альпинистов и поиска реальных документов, свидетельствующих о том, что работали они именно на Кодаре. Установлено, что промышленная разведка действительно проводилась в Мраморном ущелье с декабря 1949 г. до осени 1950 г., ее участниками были восемь альпинистов и два картографы. Добыча урана в Мраморном ущелье прекращена осенью 1951 г. ввиду бедности месторождения.

Туристами города были организованы три экспедиции на Кодар с целью историко-краеведческого посещения уранового рудника в Мраморном ущелье и установки мемориальной плиты в память о всех отважных участниках героической разведки: Л. Пахарьковой, С. Ходакевича, И. Калашникова, А. Багрова, Я. Аркина, В. Пелевина, И. Лапшенкова, В. Зеленова, М. Андроновой, Е. Сидоровой.

Все экспедиции в Забайкалье включали походы различной категории сложности, а также встречи с туристами и краеведами Каларского района Забайкальского края, с писателем и журналистом



Экспедиция «Кодар-2009»



Альпиниада на Кавказе, 2013

исследований вошли в третью редакцию книги А. Е. Снегура «Ключ мраморный» (научный консультант – Ал. А. Демидов).

Чтобы ходить в горах, надо уметь ходить в горах.

И. Д. Софронов

В 2013 г. в ущелье Адыр-Су на Кавказе была проведена альпиниада, посвященная памяти И. Д. Софронова, начальника математического отделения ВНИИЭФ с 1966 по 2001 г. Иван Денисович пришел в альпинизм из горного туризма после того, как в одном из походов будущий академик С. К. Годунов получил травму от удара камнем по голове. По мнению пострадавшего, только оперативные действия И. Д. Софронова позволили ему остаться в живых. И. Д. Софро-

нов не только сам хорошо ходил в горах, но и научил этому других. В качестве инструктора он отработал несколько смен в альплагере «Джайлык», был руководителем выезда городских альпинистов в Дигорию, возглавлял оргкомитет юбилейной альпиниады 2003 г., в которой приняло участие более 40 человек. В ущелье Адыр-Су есть традиция: устанавливать мемориальные доски погибшим в горах альпинистам и известным инструкторам альплагерей «Джайлык» и «Уллу-Тау». Сегодня в ущелье Адыр-Су есть памятная доска И. Д. Софронову, где он навечно рядом со своими друзьями-альпинистами – А. П. Давыдовым и Ю. М. Малыхиным, памятные доски которым были установлены здесь ранее.

Участники альпиниады-2013 совершили восхождение на вершину Эльбруса, посвященное 70-летию снятия фашистских флагов с Эльбруса.

Нетронутая природа приносит ни с чем не сравнимое духовное умиротворение. К этому присоединяется глубокое удовлетворение от преодоления препятствий. В горах зарождается скрепленная опасностями дружба с товарищами, остающаяся на всю жизнь.

И. Тамм

В 2016 г., в год 70-летия РФЯЦ-ВНИИЭФ, было организовано два крупных спортивных мероприятия: туриада в Крыму (руководитель –



Альпиниада на Алтае, 2016



Туриада в Крыму, 2016

Ал. А. Демидов) и альпиниада на Алтае (руководитель – Ан. А. Демидов).

В туриаде приняли участие три группы: молодежная, ветеранская и группа родителей с детьми. Руководители групп (Т. А. Олесницкий, А. П. Пепеляев, В. Ф. Кузнецова) разработали индивидуальные маршруты по Крыму. Все три группы встретились 12 июня 2016 г. в Севастополе, чтобы отметить День России и возложить цветы к Вечному огню на Сапун-горе.

Альпиниада состоялась в июле на Алтае в ущелье Актру. Участники совершили массовое восхождение на пик академика Тамма и установили на предвершинной полке памятную доску. Не случайно пик носит имя академика. Игорь Евгеньевич Тамм был страстным поклонником гор. Он часто повторял: «Как же можно жить без альпинизма?». Свою любовь к горам он передал сыну Евгению, который стал начальником первой советской экспедиции на Эверест в 1982 г.

Кроме того, участники альпиниады совершили еще несколько восхождений, в том числе на высшую точку района – г. Актру (4044 м). Тогда же появилось желание подняться на вершины пиков «Академик Сахаров» и «Курчатов», находящихся в соседнем ущелье Шавло.

Замечательное место Крым. Очень люблю его.

И. В. Курчатов

Более 13 лет жизни руководителя Атомного проекта СССР И. В. Курчатова тесно связано с Крымом. В Симферополе он учился в гимназии, в университете. В Севастополе в бухте Голландия под руководством А. П. Александрова и И. В. Курчатова были проведены первые в стране успешные опыты размагничивания кораблей Черноморского флота. В Мисхоре у Курчатова была дача, которую за практическое решение в СССР проблемы использования атомной энергии (создание атомных реакторов и атомной бом-



На тропе Курчатова. СПМ «Крым-2018»

бы) ему в личную собственность безвозмездно передало Советское правительство. В 1950-х гг., уже будучи известным физиком-ядерщиком, И. В. Курчатов часто отдыхал в Ливадии. Именно там, в Ореанде, ведущая на вершину горы Ай-Никола тропа, по которой любил ходить ученый, официально названа его именем – «Тропа Курчатова». Во второй половине 1960-х гг. в начале тропы была установлена доска с барельефом ученого и его словами: «Горные прогулки – это вдохновение для творческой работы, которое я всегда испытывал, поднимаясь к вершине Ай-Никола». В 1990-х гг. доска исчезла. В 2011 г. силами сотрудника ялтинского Историко-литературного музея Л. В. Петренко была установлена новая плита со словами ученого, но и она пропала в 2013 г. Поэтому в 2018 г., в год 115-летия со дня рождения академика, нами было решено организовать спортивно-патриотическое мероприятие (СПМ) «Крым-2018» (руководитель – М. А. Власова), в рамках которого планировалось восстановить памятную доску на тропе Курчатова в Ореанде. Установка памятной доски – дело непростое и долгое, подготовка началась в конце 2017 г. Первым делом нужно было решить все административные вопросы, касающиеся законности ее установки. Тогда же возникла идея посетить музей НИЦ «Курчатовский институт» в Москве. Что мы и сделали в феврале 2018 г., и о чем написали в журнале «Атом» № 4 (80). Заключительный этап СПМ «Крым-2018» проходил в мае. Участники посетили гимназию № 1, в которой учился И. В. Курчатов, его дачу в Мисхоре, знаменитый санаторий «Нижняя Ореанда» в Ливадии и установили памятную доску на тропе. Открытие доски прошло на высшем уровне: на митинге присутствовали Л. И. Бабий (заместитель ми-

нистра курортов и туризма Республики Крым), И. В. Максимов (директор Историко-литературного музея г. Ялты), В. Н. Клычников (депутат Госсовета РК), жители поселка Гаспры, г. Ялты и др.

По завершении торжественных мероприятий участниками СПМ «Крым-2018» был совершен поход 1-й категории сложности по горному Крыму.

*Просто, скромно, без апломба
Сообщило миру ТАСС,*

*Что, мол, атомная бомба
Есть у вас и есть у нас.*

С. В. Михалков

В 2019 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ торжественно отмечали 70-летие испытания первого отечественного ядерного заряда РДС-1 на Семипалатинском полигоне. В том же году исполнилось 65 лет с момента организации на архипелаге Новая Земля Центрального полигона (ЦП) РФ, открытие которого было вызвано необходимостью дальнейшего совершенствования ядерного оружия. По инициативе руководства РФЯЦ-ВНИИЭФ было принято решение об изготовлении и установке на ЦП РФ памятного знака, посвященного этим двум знаменательным событиям 2019 г.

Памятный знак был разработан и изготовлен в Институте экспериментальной газодинамики и физики взрыва (ИФВ). Изначально предполагалось, что знак будет выполнен в форме шара диаметром 800 мм с отражающей поверхностью, который должен быть виден судам, проходящим через пролив Маточкин Шар. Однако изготовление знака такой формы представляло собой большую сложность в плане технологии. Сотрудниками ИФВ была предложена новая конструкция памятного знака, которую можно реализовать собственными силами. Знак представляет собой многогранник из пяти- и шестиугольных элементов. Такой формой он символизирует имплозивную схему первого заряда. 6 августа 2019 г. в торжественной обстановке состоялась символическая передача памятного знака начальником отдела ИФВ В. А. Огородниковым заместителю начальника научно-испытательного отделения 14 – начальнику экспедиции на ЦП РФ Д. В. Стаханову.

В день юбилея Центрального полигона РФ памятный знак был установлен участниками экспедиции РФЯЦ-ВНИИЭФ на Аллее Героев в п. Северный на Новой Земле. На памятной доске выгравированы слова главного конструктора и научного руководителя КБ-11 Ю. Б. Харито-



*СПЭ «Полигоны ради мира». Памятный знак на ЦП РФ
в пос. Северный, Новая Земля*

на: «...Главный парадокс нашего времени в том и состоит, что самое изощренное оружие массового уничтожения до сих пор содействует миру на Земле, являясь мощным сдерживающим фактором...».

Наше участие в организации разработки и сопровождении изготовления памятного знака было частью программы комплексной спортивно-патриотической экспедиции (СПЭ) «Полигоны ради мира». Спортивно-экскурсионная часть экспедиции «Полигоны ради мира» (руководитель – М. А. Власова) состоялась в Крыму, где альпинисты и скалолазы приняли участие в учебно-тренировочных сборах и соревнованиях, а туристы совершили радиальные трекинговые выходы. Экскурсионная программа включала: «Севастопольскую Голландию», где будущие академики – Герои И. В. Курчатов и А. П. Александров проводили работы по размагничиванию кораблей, и находится памятник размагнитчикам; Багеровский полигон вблизи Керчи, где в 1948 г. испытывалась и исследовалась баллистика корпусов для первой советской атомной бомбы РДС-1. И, наконец, главный объект нашей программы – гимназия № 1 имени К. И. Щёлкина в г. Белогорске (бывший Карасубазар), где учился будущий член-корреспондент Академии наук СССР, основатель всего газодинамического направления работ на «объекте» – КБ-11, впоследствии основатель и научный руководитель НИИ-1011 (РФЯЦ-ВНИИТФ). Имя К. И. Щёлкина присвоено школе 27 октября 1969 г., вскоре после его кончины. Каждый год, в мае, на торжественной линейке происходит посвящение первоклассников в щёлкинцы. В 1973 г. в школе открылся музей К. И. Щёлкина, экскурсию по которому нам провели гимназисты-щёлкинцы. После знакомства со школой вместе с директором Алексеем Викторовичем Овсянниковым мы прошли к дому на улице Гоголя, в котором проживала семья К. И. Щёлкина. В октябре 2019 г., к 50-летию со дня присвоения школе имени К. И. Щёлкина, нами был разработан эскиз юбилейного значка. При поддержке председателя профсоюзной организации РФЯЦ-ВНИИЭФ Ивана Александровича Никитина было изготовлено и передано гим-



В гимназии имени К. И. Щёлкина

назии 1500 значков (для вручения учащимся и выпускникам).

Сахаровские экспедиции – это «времен связующая нить». Слова, вынесенные в заголовок статьи, – строки из стихотворения участника второй сахаровской экспедиции Ю. Пустовалова, написанного в 1992 г., посвящены они Андрею Дмитриевичу Сахарову.

История сахаровских экспедиций началась в 1991 г. с восхождения на Эльбрус в честь 70-летнего юбилея А. Д. Сахарова. Первая сахаровская эльбрусская экспедиция под руководством В. М. Мальцева открыла новое направление в альпинизме – народные восхождения, посвященные великим людям нашего времени. После успешной первой сахаровской экспедиции у ее участников возникла идея назвать безымянную вершину именем А. Д. Сахарова, увековечив тем самым его имя. И подходящая вершина нашлась на Северо-Чуйском хребте Алтая. Так в 1992 г. состоялась вторая сахаровская экспедиция, в рамках которой было совершено восхождение на безымянную вершину Ш-12. Она расположена в красивейшем месте Алтайских гор – в районе Шавлинских озер, которые Борис Николаевич Делоне, знаменитый российский математик и альпинист, назвал «Чемпионом красоты». Поблизости от нее находятся вершины Эйнштейна, Тамма, Курчатова и ряда других академиков.

Очевидно, что 2021 г. – год 100-летия академика Сахарова – должен был войти в историю



Над Шавлинскими озерами, 2021 г.

наших спортивно-патриотических мероприятий. Было решено осуществить задумку 2016 г.: провести спортивно-патриотическую экспедицию «Алтай-2021», в рамках которой посетить район Шавлинских озер и совершить восхождение на вершину Ш-12 «Академик Сахаров» и пик «Курчатов» с установкой памятных досок.

Базовый лагерь находился в живописном месте – на слиянии двух рек в 40 км от поселка Чибит. Заброска грузов осуществлялась с использованием лошадей. Перед восхождениями была разведка подходов с переправами через полноводные реки и ручьи, а также преодоление вброд высокогорного озера. Пришлось разбиться на две группы.

Первая группа под руководством А. А. Стаевича (КБ-2) совершила восхождение на пик

«Курчатов» и установила на вершине памятную доску.

Сборная города Сарова по альпинизму под руководством председателя городской федерации альпинизма С. В. Коновалова вышла на восхождение на пик «Академик Сахаров» по маршруту В. М. Мальцева. Группа преодолела камнеопасный кулуар и вышла на гребень. Однако в 200-х метрах от вершины группу накрыло грозное облако и пришлось начать спуск. Выйдя из облака, участники установили памятную доску на скальной перемычке в гребне пика «Академик Сахаров».

Теперь на трех красивейших вершинах, носящих имена академиков И. Е. Тамма, И. В. Курчатова и А. Д. Сахарова, установлены памятные доски, изготовленные в ИФВ, а гравировка портретов и надписей сделана лазером в ИЛФИ под руководством Виктора Константиновича Баранова.

Участники экспедиций благодарят руководство и профсоюзный комитет РФЯЦ-ВНИИЭФ за материальную помощь, а также отдел физкультуры и спорта РФЯЦ-ВНИИЭФ и департамент по делам молодежи и спорта г. Сарова за поддержку и помощь в подготовке и проведении спортивно-патриотических мероприятий.



СПЭ «Алтай-2021». В базовом лагере

ВЛАСОВА Марина Александровна – старший научный сотрудник ИФВ

ДЕМИДОВ Андрей Александрович – старший научный сотрудник ИФВ

Один из старейших отделов

К 75-летию четвертого отдела газодинамиков

М. В. ЖЕРНОКЛЕТОВ, А. М. ПОДУРЕЦ

В мае 2022 г. исполняется 75 лет одному из старейших отделов ВНИИЭФ, отделу 0304 ИФВ, ведущему отсчет времени с момента создания в КБ-11 лаборатории № 4, первым руководителем которой был Лев Владимирович Альтшулер. Для отдела дата солидная, но не является символом угасания, а скорее признаком основательности и накопленного опыта. Из воспоминаний Л. В. Альтшулера: «Главной целью работы при организации лаборатории были исследования поведения ДМ. Мы изучали сжимаемость урана и плутония. От этого зависела эффективность разрабатываемых атомных бомб. Теоретические предсказания были неоднозначны, зависели от многих допущений. Эта неопределенность была устранена в нашей лаборатории, где были разработаны высокоскоростные полусферические взрывные метательные системы (опубликованные только в 1996 г.) и точный метод регистрации сжимаемости, названный нами "методом торможения". В этом методе регистрировались скорость ударной волны в сердечнике и на радиусе удара оболочки, вложенной в полусферический заряд, ее скорость движения. Эти величины определяли плотность и давление в сердечнике при мегабарных давлениях».

Для успешных результатов работы созданного института было необходимо исследовать свойства многих веществ при высоких и сверхвысоких давлениях и температурах, создать и развить новую научную дисциплину – физику высоких плотностей энергии, первопроходцами которой являлись такие блестящие ученые отдела, как Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер, К. К. Крупников, А. А. Баканова, Р. Ф. Трунин, Ю. М. Стяжкин, В. Н. Зубарев, В. Д. Урлин, А. И. Фунтиков и другие талантливые специалисты.

За 75-летний период существования отдела в нем трудились более сотни человек. В отделе работали и продолжают работать сотрудники, внесшие заметный, а иногда и выдающийся вклад в достижения отдела и ВНИИЭФ, отмеченные различными государственными наградами. Л. В. Альтшулер являлся лауреатом Ленинской и трех Государственных премий, премии Правительства РФ; Ю. М. Стяжкин – лауреат Ленинской и Государственной премий; Р. Ф. Трунин – двух Государственных премий

и премии Правительства РФ; А. А. Баканова – двух Государственных премий; А. В. Сельверов, Е. Я. Юрин, В. С. Степанюк – лауреаты Государственных премий; Е. Н. Богданов, М. В. Жерноклетов, А. Б. Медведев, М. А. Мочалов, Л. В. Попов, А. В. Родионов, А. Г. Севастьянов, Г. В. Симаков, Г. С. Телегин – премии Правительства РФ. Более 20 сотрудников отдела защитили кандидатские диссертации; 7 сотрудников – Л. В. Альтшулер, Ю. М. Стяжкин, Р. Ф. Трунин, М. Н. Павловский, М. В. Жерноклетов, В. А. Борисенок, А. Б. Медведев – стали докторами наук.

С 1958 г. сотрудники печатаются в академических изданиях, в том числе в ведущих журналах УФН, ЖЭТФ, ФГВ, ПМТФ, трудах конференций и симпозиумов и др. К 60-летию отдела по инициативе Р. Ф. Трунина в ИПК РФЯЦ-ВНИИЭФ изданы четыре тома сборника «Поведение веществ под воздействием сильных ударных волн», в котором представлены практически все статьи (более 250), опубликованные сотрудниками отдела в период с 1958 по 2007 г. К 70-летию отдела издан пятый том из этой серии, в который включены 50 статей и докладов, написанные сотрудниками отдела в период с 2008 по 2015 г. В последние 20 лет выпущено несколько монографий, в которых представлены описания экспериментальных методов исследования взрывных явлений и детонации, физических, механических и оптических свойств конденсированных сред, подвергнутых ударно-волновому воздействию. В 2006 г. вариант монографии с названием «Material Properties under Intensive Dynamic Loading» под редакцией М. В. Жерноклетова и Б. Л. Глушака опубликован за рубежом издательством Springer. А первой за рубежом (в 1998 г.), в Кембридже, была издана монография Р. Ф. Трунина «Shock Compression of Condensed Materials». Многие сотрудники отдела являются авторами научно-популярной и мемуарной литературы, сборников справочного характера, учебных пособий. Практически к юбилею отдела в издательстве РАН вышла монография «Экспериментальные методы и средства для исследования свойств вещества в экстремальных состояниях» под редакцией Р. И. Ильяева, А. Л. Михайлова, М. В. Жерноклетова.

В первой половине 1960-х гг. отделу было поручено заняться измерениями мощности ядерных зарядов при их подземных испытаниях. Актуальность этого поручения связана с тем, что при переходе к подземным испытаниям в стране не оказалось простого метода определения энергии взрыва зарядов большой мощности, по точности примерно совпадающим с точностью метода огненного шара (ОШ). По предложению сотрудников Уральского ядерного центра метод стал называться методом грунтового шара – МГШ. Решение вопросов газодинамики, тогда в отделении ОЗ, имеющих отношение к МГШ, было поручено Р. Ф. Трунину. Ему же поручалось осуществлять связь с теоретиками и конструкторами, а также курировать выполнение работ по подготовке к испытаниям. Ответственными за подготовку измерений и их проведение на испытаниях от отдела были Б. Н. Моисеев и Л. В. Попов.

32 сотрудника отдела участвовали в испытаниях 10 и более раз, а рекордсменами среди них были:

- Валерий Александрович Погорелый – 43 поездки;
- Борис Николаевич Моисеев – 37 поездок;
- Леонид Владимирович Попов, Александр Яковлевич Матвеев, Анатолий Григорьевич Севастьянов – 33 поездки.

Вера Александровна Бугаева на полигонах не была, но совместно с Г. С. Телегиным выполняла важную и непростую работу по выяснению вопросов асимметрии ударной волны на первых стадиях ее движения в скважине. Основным источником асимметрии были вакуумные трубы, по которым подводилось излучение к датчикам регистраций, что искажало сферическую волну взрыва, превращая ее форму в грушевидную. Анализ результатов испытаний зарядов с разной энергией, количеством и длиной используемых труб позволил оценить критические зоны их влияния на формирование сферической волны. Ими же совместно с Г. В. Симаковым обобщены данные по ударной сжимаемости горных пород и минералов.

Всего за годы работы на полигонах с использованием МГШ сотрудники отдела участвовали в 120 испытаниях! По



В. А. Бугаева



М. Н. Павловский и Г. С. Телегин в парке им. Зернова. Начало 1980-х гг.

современным меркам такое количество – уму непостижимо! Вот таков был энтузиазм в работе всего коллектива ВНИИЭФ. Об этих незабываемых героических днях рассказано в книге Р. Ф. Трунина «Рядом с эпицентром взрыва» (Саров, ВНИИЭФ, 2004 г.).

О направлениях исследований в отделе и их исполнителях существует достаточно много публика-

ций, в том числе в журнале «Атом», мемуарах Р. Ф. Трунина. Так, № 59 «Атома» (2013 г.) посвящен 100-летию со дня рождения Л. В. Альтшулера, а несколько статей № 63 (2014 г.) посвящены Г. С. Телегину – известному во ВНИИЭФ и других организациях Росатома испытателю ядерных зарядов разного калибра.

Следует сказать, что ряд сотрудников отдела, к сожалению, не отмечен званиями лауреатов различных премий прежде всего из-за ограничений выдвигаемых составов квотами, выделенными в подразделения. Но многие из них внесли достойный вклад в копилку достижений отдела и ВНИИЭФ и оставили о себе своей бескорыстной работой добрую память. Некоторых из них нам хочется вспомнить.

Михаил Николаевич Павловский (1928–2000). В Сарове когда-то ходила поговорка: «У нас есть три Павловских: Павловский большой, Павловский красивый и Павловский Саша». Павловский большой – это Михаил Николаевич, о котором идет речь. Вес его был около 130 кг, в молодости он был чемпионом Ленинграда по штанге в тяжелом весе. Павловский красивый – Евгений Семенович, работал в теоретическом секторе, а Павловский Саша – Александр Иванович, начальник 4-го сектора, академик.

Михаил Николаевич был добрым и общительным человеком. Когда в отделе появлялся новый молодой сотрудник, он брал над ним своеобразное шефство, если конечно, молодой не возражал. Был Павловский прекрасным рассказчиком и отличным экспериментатором. Его имя на титульном листе отчета или статьи означало некий знак качества, такое отношение к экспериментальным результатам Павловского

сохраняется до сих пор. А еще Михаил Николаевич хорошо умел объяснить что-то непонятное младшим научным сотрудникам, не получившим в институтах никакого представления о газодинамике, это было иногда очень нужно.

Однако общительность Павловского была избирательна. Он не принимал участия в шумных отдельных сборищах, вылазках в лес или на рыбалку, общение с коллегами ограничивалось рабочим временем, нерабочее время было целиком посвящено семье.

Помнят и знают Михаила Николаевича Павловского и как классика исследований фазовых переходов в ударных волнах, и как одного из разработчиков быстродействующих взрывных затворов каналов вывода излучений при проведении подземных ядерных экспериментов. Михаил Николаевич разработал конструкции прецизионных измерительных устройств для разных диапазонов давлений и провел фундаментальные исследования по динамической сжимаемости ионных и валентных кристаллов, создал ряд новых методик, позволивших получить уникальные результаты, опередив зарубежных коллег.

Где-то в начале 1980-х гг. Михаилу Николаевичу захотелось защитить докторскую диссертацию. «Я буду первым доктором из негров», – говорил он. И действительно, докторов наук в должности старшего научного сотрудника тогда еще не было. Вообще докторов во ВНИИЭФ было тогда на удивление мало – всего около 30 человек. Были у Павловского трудности с защитой, несмотря на невероятную толщину диссертации – примерно в 2–3 раза больше среднестатистической докторской. Тем не менее, своего Михаил Николаевич добился, очень много чего все-таки им было сделано.

Персонально хотелось бы отметить научный вклад Валентина Николаевича Зубарева (1929–1989), в силу разных причин тоже не отмечен Государственной премией. Его оригинальное предложение о рентгенографии движения при наклонном расположении фольги в заряде ВВ привело к существенному увеличению информативности опытов за счет непрерывной регистрации параметров движения продуктов взрыва (ПВ), начиная с фронта



В. Н. Зубарев

детонации. Наиболее ярким в этом направлении исследований является предложение о регистрации характеристик течения за фронтом детонационной волны путем рентгеновского наблюдения за эволюцией возмущений, возникающих после взаимодействия ударных детонационных фронтов с малыми воздушными зазорами. Регистрация этих параметров позволила определить характеристики движения ПВ за фронтом волны и получить сведения об изоэнтропе расширения ПВ.

На основании теории свободного объема В. Н. Зубарев и Владимир Ващенко получили связь тепловых и упругих компонентов в давлении и энергии (известная в мировой науке как «формула Зубарева – Ващенко»).

Во ВНИИЭФ и других научных организациях России Валентин Николаевич известен как автор «УРС ПВ в форме Зубарева», которое введено в газодинамические программы и широко используется во ВНИИЭФ разработчиками ЯЗ уже более 50 лет.

Александр Николаевич Шуйкин сейчас уже на пенсии. Он был мастером на все руки: мог спаять электронную схему и запрограммировать решение системы уравнений. Хорошо знал приборную базу и многое делал в экспериментальном плане на площадке и полигонах севера и юга. Кроме того, он отличался прекрасным чувством юмора и мягким характером, всегда был готов прийти на помощь.



А. Н. Шуйкин



А. М. Исаков

В числе группы сотрудников Александр Николаевич активно занимался отработкой генераторов ударных волн плоской геометрии. Один из генераторов, известный в отделе как «шуйкинская пушка», с успехом используется в исследованиях и поныне.

Среди оригиналов (антиков, по выражению Н. Лескова) 4-го отдела надо отметить Александра Максимовича Исакова. Был он человеком большой работоспособности и неумной энергии, занимался исследовани-

ями свойств ВВ. Вместе со старшим коллегой Иваном Степановичем Клочковым они перешли в наш отдел из 10-го, где занимаются технологией и свойствами взрывчатки. Его опыты отличались тщательностью постановки и то, с каким пылом и какими подробностями Саша мог рассказывать на семинаре или на научно-техническом совете о своей работе, вызывало уважение. Его кандидатская диссертация с уникальными результатами была шедевром и с точки зрения оформления. Иллюстрации для нее он не просто клеивал, как поступали 100 % соискателей, а компоновал их и текст с таблицами на отдельном листе фотобумаги размером с машинописную страницу, при этом экспонировал рисунок на часть листа, другую часть закрывал специально изготовленной маской, потом менял их местами, чтобы страница рукописи, содержащая рисунок и текст, выглядела, как отпечатанная в типографии. Это была большая и кропотливая работа, способным ее сделать был только Исаков. Сейчас бы его назвали перфекционистом, но тогда такого слова мы не знали.



В перестройку Александр стал членом КПСС, стоял на демократической платформе, вступил в общество борьбы за трезвость и был его руководителем в отделении 03. (На фото – значок общества).

После защиты диссертации, когда локальная цель была достигнута, его душа стала рваться к другим вершинам. Когда наступили времена относительной экономической свободы, Александр временно (как оказалось впоследствии) отошел от проблем физики взрыва и вступил на путь предпринимательства. Делая все как всегда обстоятельно и педантично, он по направлению ВНИИЭФ в 1991 г. поступил и в 1993 г. окончил очную магистратуру экономического факультета МГУ по специальности «Международный бизнес». Вместе с группой бывших и действующих сотрудников ВНИИЭФ и завода «Авангард» им было создано Акционерное общество (АО) «Божественные источники Сарова», генеральным директором и председателем совета директоров которого в 1992 г. он был избран. В этом качестве проработал до мая 1998 г.

Собственно, история известной сейчас минеральной природной столовой воды «САРОВА», розлив которой начался в городе Арзамас-16 в июне 1993 г., а также история дизайна ее бренда и упаковки напрямую связана с именем

А. М. Исакова, в то время еще формально сотрудника отдела 0304, находящегося в длительном отпуске. Его скрупулезность и повышенное внимание к деталям проявились в этом бизнесе с новой силой. Продукция компании получила сертификацию высшего качества собственно воды в лабораториях США, что позволило многочисленным в те годы научным делегациям из разных стран, прибывающим во ВНИИЭФ, отказаться от объемных чемоданов с бутылками питьевой воды из Европы и США и начать пить воду из под крана в номерах гостиницы ВНИИЭФ в городе Арзамас-16. Кроме многочисленных золотых и серебряных медалей за качество продукции, полученных на конкурсах в рамках специализированных выставок в России, комплексный дизайн упаковки получил наивысшую оценку на конкурсе упаковки в Москве – «Упаковка звезда России, 1996» и «Мировая звезда для упаковки, 1996» («Worldstar for Packaging, 1996») на конкурсе упаковки в Чикаго. Новизна всех брендов и дизайна была защищена 14-ю патентами. Название воды «САРОВА» (и «SAROVA») были впервые в истории современной России зарегистрированы как наименование места происхождения товара.

Продукция АО «Божественные источники Сарова» в фирменной упаковке негазированной столовой воды занимала верхнюю, весьма дорогостоящую нишу на рынке. Воду «САРОВА» можно было увидеть с экранов телевизоров, когда показывали заседания каких-нибудь серьезных людей в Москве, в том числе и с участием Президента России Б. Н. Ельцина.

Компания получила (по конкурсу) государственную лицензию со сроком действия 25 лет на подземный горный отвод диаметром 3 км и глубиной 500 м (в районе железнодорожного КПП на территории города Арзамас-16) с правом добычи воды для розлива в бутылки в



количестве 1000 кубометров в сутки. По существу в то время бизнес-плану проекта предполагалось строительство современного завода с привлечением иностранных инвестиций производительностью 10000 бутылок в час с изготовлением из гранулированного полиэтилен-терефталата заготовок для бутылок – прессформ и собственно бутылок. К сожалению, из-за отсутствия действенной поддержки этот проект, несмотря на 100 %-ую подготовку к получению любых инвестиций, не состоялся.

В конце 1980-х гг. А. М. Исаков и И. С. Клочков завершили отработку и в 2000 г. получили авторское свидетельство на «Способ определения параметров разлета цилиндрической оболочки под действием взрыва», известный как метод Т-20, который в настоящее время приобретает «второе дыхание».

Далее Исаков занялся отработкой кумулятивных снарядов, или, как теперь говорят, ядерных вооружений. И это был один из первых, а, может быть, и вообще первый внебюджетный производственный контракт в отделе. Потом дело Исакова в этом направлении продолжил Валерий Викторович Шутов и защитил кандидатскую диссертацию в начале 2000-х гг.

За эту бьющую через край энергичность над Александром иногда подтрунивали, но и уважали. Хотя работать рядом с ним было порой не просто. Он мог, например, неожиданно для посторонних, пришедших пообщаться с его соседями по комнате, велеть замолчать и покинуть помещение – ему надо работать. Понятно, что по большому счету он был прав, но решаются не такие поступки немногие.

В конце 1990-х гг. Исаков уехал из города. С ноября 2007 г. и по настоящее время Александр Максимович Исаков снова в специальности, только на мирных рельсах: работает главным специалистом в АО «Институт взрыва» (группе компаний AV-group), занимается разработкой промышленных ВВ и физикой взрыва в наземных и подземных взрывных горных работах.

Одним из наиболее квалифицированных сотрудников отдела в области инициирования и развития детонации ВВ являлся недавно ушедший от нас начальник первой лаборатории Владимир Михайлович Бельский (1947–2021).

В 2019 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ вышла его монография «Механизм инициирования и развития детонации в твердых гетерогенных взрывчатых веществах» со ссылками на 320 источников. Именно он по просьбе директора



В. М. Бельский

ИФВ А. Л. Михайлова в 2017 г. написал статью «Гидродинамика подземных ядерных взрывов» для книги «Институт физики взрыва – история и современность» к 65-летию ИФВ. В статье Владимир Михайлович назвал имена 44 сотрудников отдела, принимавших участие в 120 испытаниях и обеспечивших успешное измерение ядерного энерговыделения наших изделий методом МГШ.

В 2016 г. Владимиру Михайловичу вручен знак отличия «За выдающиеся достижения в области исследований, разработок и внедрения новых образцов техники и новых технологий РФЯЦ-ВНИИЭФ».



А. А. Баканова



Л. В. Проскурина

Приблизительно седьмую часть сотрудников отдела в разные годы составляли женщины. Из их числа А. А. Баканова и Л. В. Проскурина (Кулешова) защитили диссертации и стали кандидатами физико-математических наук. А. А. Баканова – один из пионеров исследований УРС, а Л. В. Проскурина продолжила работы, начатые в 1940-е гг. Л. В. Альтшулером и А. А. Бришом, занимаясь исследованиями электропроводности материалов и продуктов взрыва за фронтами ударных волн.

Нельзя не отметить вклад в общую копилку достижений отдела и выразить огромную благодарность за их труд другим нашим женщинам: М. Бражник, Э. Ниточкиной, В. Володиной, Л. Христининой, В. Беловой, В. Бугаевой, Н. Шаболдиной, Л. Тарасовой, М. Беяковой, В. Моховой, Т. Чернышевой, Л. Кануновой, Д. Гончаровой, А. Лебедевой, С. Губачевой, И. Кондрохинной, А. Баландиной, Ю. Григорьевой.

Нельзя не отметить вклад в общую копилку достижений отдела и выразить огромную благодарность за их труд другим нашим женщинам: М. Бражник, Э. Ниточкиной, В. Володиной, Л. Христининой, В. Беловой, В. Бугаевой, Н. Шаболдиной, Л. Тарасовой, М. Беяковой, В. Моховой, Т. Чернышевой, Л. Кануновой, Д. Гончаровой, А. Лебедевой, С. Губачевой, И. Кондрохинной, А. Баландиной, Ю. Григорьевой.



Л. А. Тарасова

Неоценимую помощь в решениях социальных вопросов для сотрудников отдела оказывала Людмила Ароновна Тарасова.

Настоящими помощниками научных сотрудников и инженеров являлись наши лаборанты, многие из которых были профессионалами высокого класса. Все они прекрасно знали, что собран-

ные ими экспериментальные сборки с использованием ВВ уничтожатся и повторить опыт можно будет только в следующей редакции, поэтому не должно быть ошибок ни при подготовке, ни при проведении опытов.

Из лаборантов первого поколения назовем первую тройку: Николай Тенигин, Николай Кабаев и Юрий Лебедев. Все они работали с А. А. Бакановой. Тенигин был техником, но во многих случаях выполнял работы по сборке самых сложных сферических опытов. Одним из лучших лаборантов отдела был Юрий Борисович Лебедев – «наш Ю.Б.». Все у него было разложено «по полочкам», в его работе Баканова никогда не сомневалась. Помимо работы на внутренних площадках Ю.Б. участвовал во многих экспедициях на южном и северном полигонах страны.

В группе сотрудников М. Н. Павловского искусством сборки с использованием марганциновых и магнитоэлектрических датчиков отличались Алексей Петрович Чембаров и Анатолий Иванович Мартынов.

Авторитетом и уважением у Зубарева, Телегина и Жерноклетова пользовался лаборант Николай Маркович Филипчук. Он не только тщательно готовил сборки, но вместе с научными сотрудниками участвовал в первичной обработке фотохронограмм или осциллограмм.

Большую помощь и заинтересованность в проведении рентгенографических экспериментов в секторе А. М. Подурца оказывал и проявлял наш «правдолюб» Анатолий Викторович Цибилов.

В 2019–2021 гг. коллектив отдела пополнился несколькими молодыми сотрудниками. Каковы дальнейшие перспективы развития отдела?

Более 60-ти лет во ВНИИЭФ успешно применяется метод оптической пирометрии для измерения ударных температур прозрачных материалов, таких как ионные кристаллы галогенидов металлов, сжиженные инертные газы, жидкий

азот. Однако метод встречает много сложностей при применении к непрозрачным материалам, к которым относятся металлы. Измерения температур ударно-сжатых металлов крайне важны для выявления кривых высокотемпературного плавления, полиморфных переходов, включающих плавление, уточнения параметров в термодинамически полных уравнениях состояния. С конца 1990-х гг. в отделе начал применяться метод радиационной пирометрии для определения температур ударно-сжатых плотных газов и оптически прозрачных твердых материалов с перспективой отработки методики для измерения температур в ударно-сжатых металлах. Задачей радиационной пирометрии является экспериментальное измерение яркостных температур, по которым далее определяются термодинамические температуры. О сложности задачи можно судить по анализу результатов, полученных в зарубежных лабораториях, который свидетельствует о том, что часто существуют значительные рассогласования (иногда в тысячи градусов) в локализации границ плавления по теоретическим расчетам и статическим или динамическим измерениям. В связи с этим в мире разрабатываются новые и улучшаются прежние методики выявления границ плавления ударно-сжатых металлов с использованием новейшей диагностической аппаратуры. Для нас главное в том, что отработку пирометрической методики нужно целеустремленно продолжать.

Практически со времени образования отдела сотрудники включились в решение важной задачи по отработке методов определения давления детонации взрывчатых веществ, формирующих сходящуюся ударную волну в делящихся материалах. Известна эпопея со взрывчаткой перед испытанием первой бомбы, когда в аварийном порядке несколько групп экспериментаторов, в том числе из лаборатории Л.В., буквально «стояли на ушах», пытаясь свести значения давлений детонации, определенные разными методиками, к единой величине. И это удалось сделать! Об этом вспоминают первопроходцы атомного проекта в разных публикациях. С тех пор исследования детонационных характеристик ВВ и уравнений состояния продуктов взрыва занимают важное место в тематике отдела и не потеряли своей актуальности и сегодня в решении задач, стоящих перед ВНИИЭФ. В 1967 г. мы впервые в России стали изучать изэнтропы расширения путем разгрузки ПВ в разные газы (аргон, ксенон, воздух) при различных начальных давлениях. В настоящее время в исследованиях УРС



75-летие отдела 0304. Музей ядерного оружия РФЯЦ-ВНИИЭФ, июнь 2021 г.

ПВ используются современные методы регистрации на основе многоканальных микроволновых и лазерных интерферометрических систем.

Совместно с теоретиками успешно продолжают работы по изучению кинетики детонации. Результаты исследований используются во ВНИИЭФ для калибровки и верификации кинетических моделей. В экспериментальных исследованиях последних лет активно применяются нагружающие установки ствольного типа, а для регистрации характеристик процессов – современные диагностические методы.

В фокусе нашего внимания были и остаются исследования фазовых превращений различных веществ как при ударно-волновом сжатии, так и последующем изэнтропическом расширении.

Более 45 лет мы сотрудничаем с командой академика В. Е. Фортова из Института проблем химической физики в г. Черноголовке и Объединенного института высоких температур в г. Москве по исследованиям неидеальной плазмы металлов, полимеров, инертных газов, азота, водорода, дейтерия при различных режимах сжатия. Совместные работы по этим направлениям с высококвалифицированными сотрудниками из этих институтов будут продолжены.

Молодыми сотрудниками с участием опытных специалистов активно внедряются в новые области исследований и остаются приоритетными методы микроволновой диагностики и гетеродин-интерферометра на основе эффекта Доплера.

Отмечая 75-летний юбилей отдела с гордостью заметим, что вклад сотрудников в общее

дело разработки и испытания ядерного оружия неоченим. Перед отделом, особенно в начальный период его существования, стояли серьезные научные и технические проблемы с неизвестными решениями, права на ошибку не было, поскольку ее цена была бы непомерно высока. С честью и достоинством сотрудники выполняли свой долг и самоотверженным коллективным трудом способствовали созданию ядерного щита России.

Совет ветеранов ИФВ давно работает над биографиями ведущих сотрудников отдела Л. В. Альтшулера. После публикации укороченных версий статей во вкладке РФЯЦ-ВНИИЭФ газеты «Страна Росатом» полная версия всегда появляется на сайте «Саровский краевед» (sarpust.ru) в рубрике «Люди объекта». Так было с юбилейными статьями о М. Н. Павловском, В. Н. Зубареве, Р. Ф. Трунине, Ю. М. Стяжкине и других сотрудниках ИФВ. На сайте есть свой поисковик, где по фамилии сразу можно найти соответствующую статью. Льву Владимировичу Альтшулеру, например, на сайте посвящен целый цикл статей, в том числе не вошедших в юбилейный журнал «Атом» (№ 59, 2013 г.) к 100-летию Л. В. Альтшулера.

ЖЕРНОКЛЕТОВ Михаил Васильевич –

главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ

ПОДУРЕЦ Алексей Михайлович –

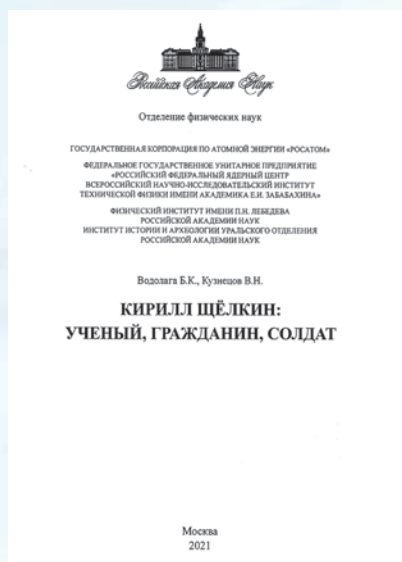
ведущий научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук

Кирилл Щёлкин: ученый, гражданин, солдат

Во второй половине 2021 г. издательство Российской академии наук выпустило книгу, посвященную жизни и научной деятельности выдающегося ученого, члена-корреспондента Академии наук СССР, трижды Героя Социалистического Труда, трижды лауреата Сталинских (I степени) и Ленинской премий, основателя и первого научного руководителя НИИ-1011, ныне ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», Кирилла Ивановича Щёлкина. В книге помещена максимально возможная информация о его вкладе в реализацию советского атомного проекта, в отечественное ракетостроение и освоение космического пространства.

В период с 1947 по 1955 г., до создания НИИ-1011, Щёлкин работал в КБ-11 (ныне ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») в должности первого заместителя научного руководителя (Ю. Б. Харитона), являясь одновременно начальником научно-исследовательского сектора (НИС, 1948–1952 гг.) и начальником отдела натурной газодинамической отработки и полигонных испытаний ядерных зарядов (1947–1950 гг.).

В книгу включены избранные открытые научные труды К. И. Щёлкина, его биографические данные, библиография его публикаций и публикаций о нем, выписки из приказов, указаний, распоряжений, выдержки из переписки Министерства среднего машиностроения, главка и института (НИИ-1011).



АТОМ

Научно-популярный журнал для всех, кто интересуется историей создания ядерного оружия, новыми направлениями развития современной физики, наукоёмкими технологиями

Учредитель –
ФГУП «Российский федеральный
ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), г. Саров.
Зарегистрирован Госкомитетом РФ
по печати за № 12751
от 20.07.94 г.

С содержанием журналов можно
ознакомиться на сайте РФЯЦ-ВНИИЭФ
www.vniief.ru

Адрес редакции:
607188, г. Саров Нижегородской обл.,
пр. Мира, 37, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Тел.: (831-30) 775-85,
факс: (831-30) 776-68,
e-mail: volkova@vniief.ru

Индекс подписки
в Объединенном каталоге
«Пресса России» 72249

Публикации отдела ИФВ

