

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 быстротекущих процессов». В коллектив входили еще трое представителей известных школ радиофизиков 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 быстротекущих процессов достаточно давно, во всяком случае, он появился в их арсенале до появления методов лазерной доплеровской диагностики. Это вполне объяснимо, так как радиофизики 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 радиофизиков 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 радиофизиков.

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.

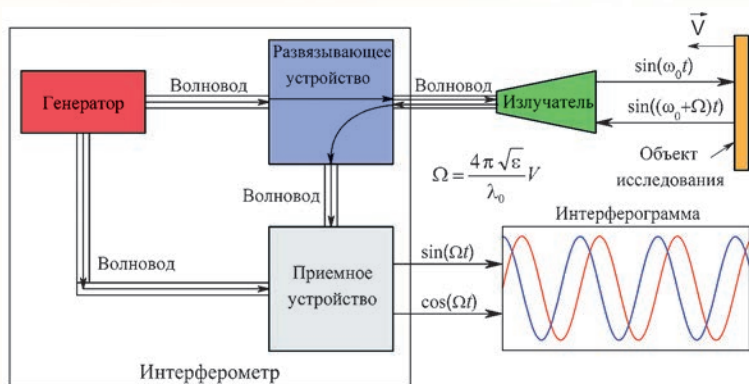
Есть и другие преимущества, используемые в наших исследованиях. Иными словами, оба метода доплеровской диагностики, различаясь по своим возможностям, взаимно дополняют друг друга.

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.

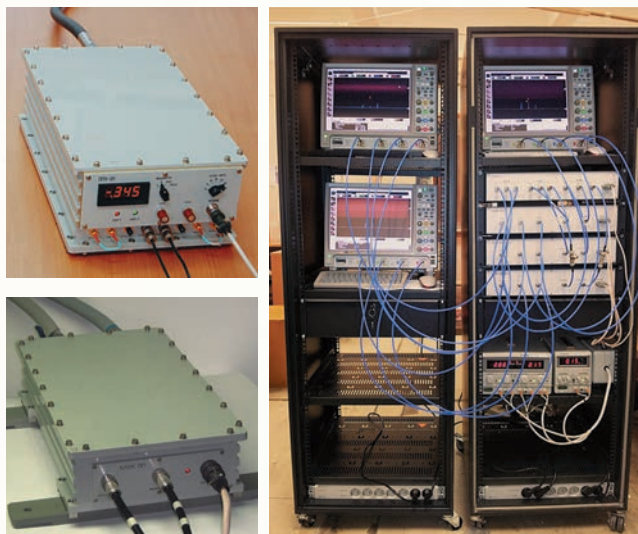
Интерферометр миллиметрового диапазона состоит из генератора электромагнитных колебаний, развязывающего устройства, излучателя (антенны), приемного устройства и блока регистрации данных. Высокочастотные элементы схемы соединены волноводным трактом. Исследуемый объект может находиться в непосредственном 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-

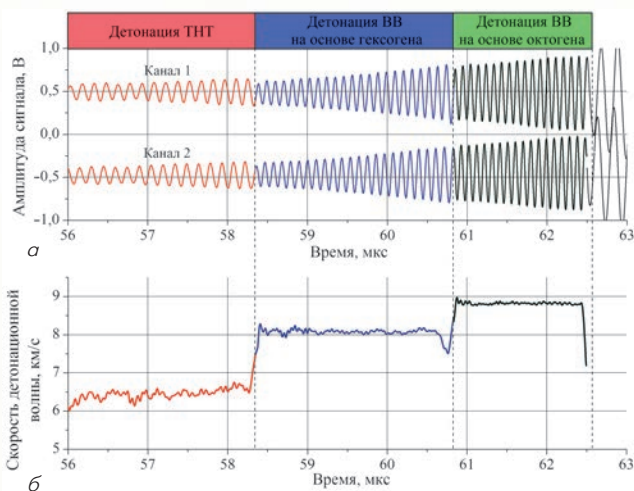
ских реакций во взрывчатых веществах реализуются высокие давления и температуры, что приводит к скачку плотности и ионизации продуктов детонации и возникновению высокой проводимости, благодаря чему зондирующее излучение радиоинтерферометра отражается от фронта детонационной волны.

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 активной заряде и ударной волны в преграде.

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

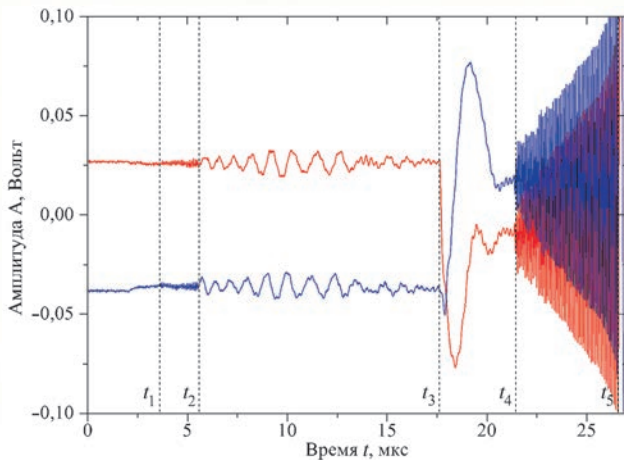


Экспериментальная интерферограмма (а) и зависимость скорости детонации от времени в составном заряде ВВ (б)

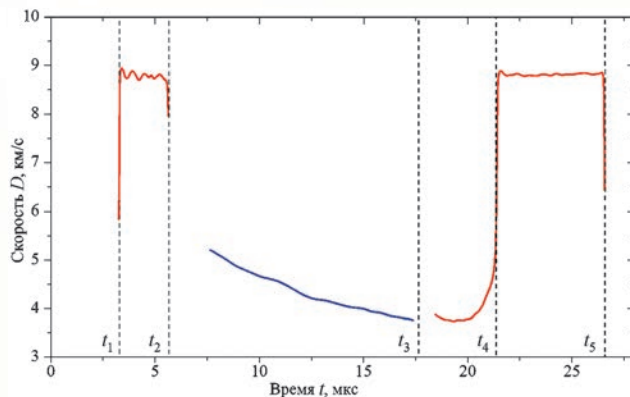
ментов при максимальном количестве зафиксированных параметров и варьировании какого-либо одного из них (давление на фронте ударной волны, длительность импульса, начальная плотность, начальная температура, ударно-волновая чувствительность и т. д.). Одним из основных типов подобных тестовых экспериментов 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

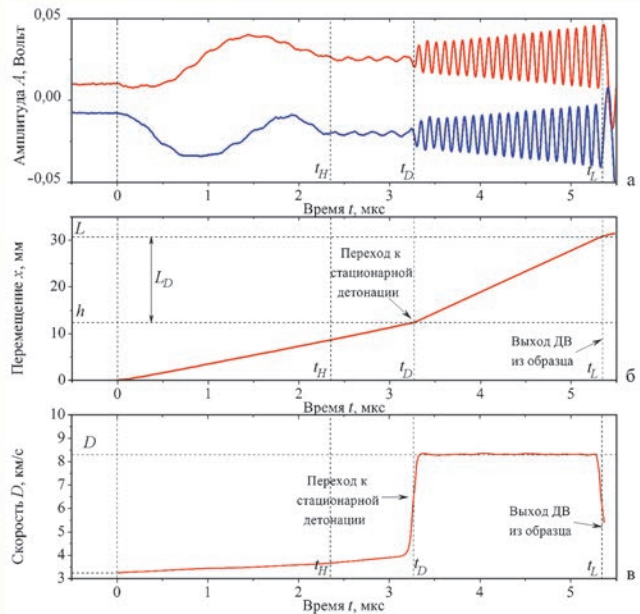


Зависимости скорости фронтов ударной и детонационных волн от времени. t_1-t_2 – детонация активного заряда; t_2-t_3 – движение ударной волны в преграде; t_3-t_4 – переход к детонации в образце ВВ; t_4-t_5 – детонация образца ВВ

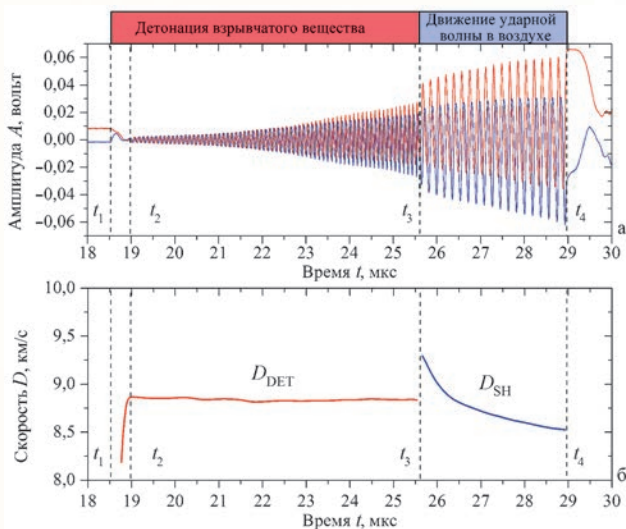
шей из металлического экрана, и результаты ее обработки приведены на следующем рисунке в виде зависимостей перемещения и скорости фронта инициирующей ударной волны и детонационной волны от времени. Обращает на себя внимание одновременное присутствие на интерферограмме высокочастотной и низкочастотной 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.

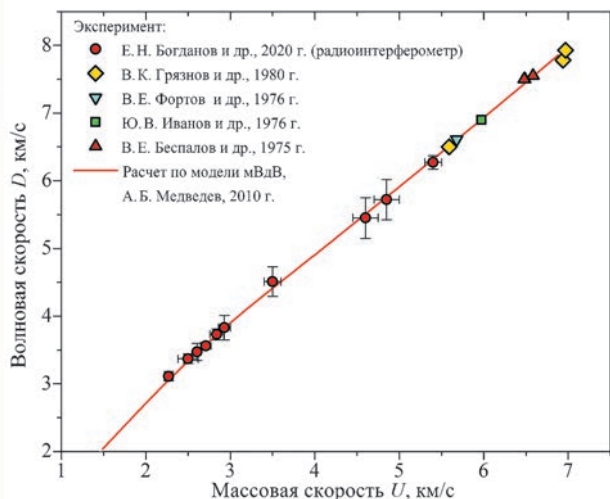
Вследствие высокой проводимости газов за фронтом мощных ударных волн возможна регистрация их движения, что демонстрирует следующий рисунок, на котором представлена ин-



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.

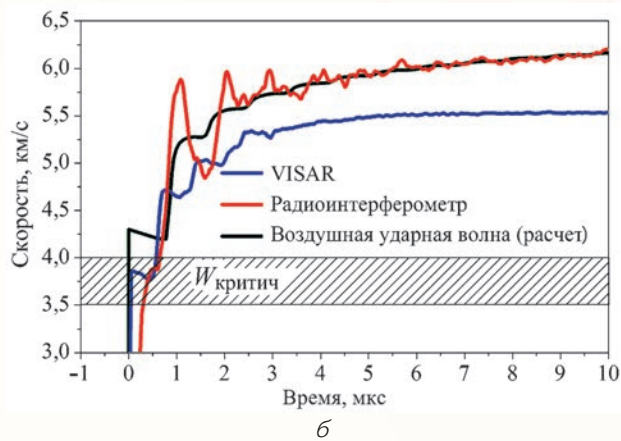
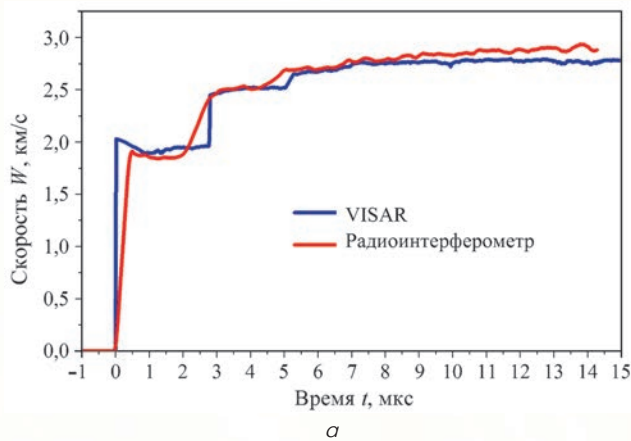
Возможность регистрации движения ионизирующих ударных волн в газах с помощью радиоинтерферометра используется для исследования их уравнений состояния в широкой области изменения параметров. На рисунке представлена в D - U -переменных ударная адиабата аргона, изначально находившегося при атмосферном давлении 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

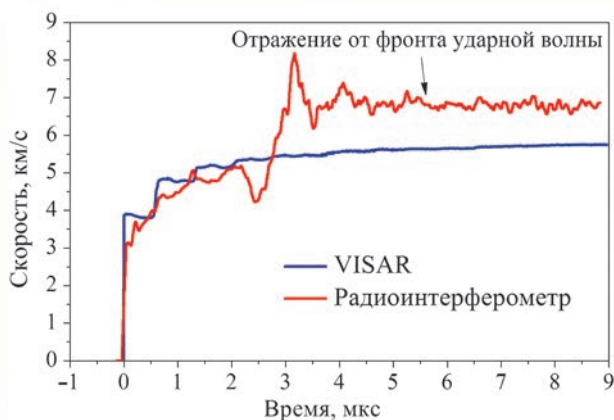


Результаты экспериментов по непрерывной регистрации движения металлических лайнеров в атмосферном воздухе

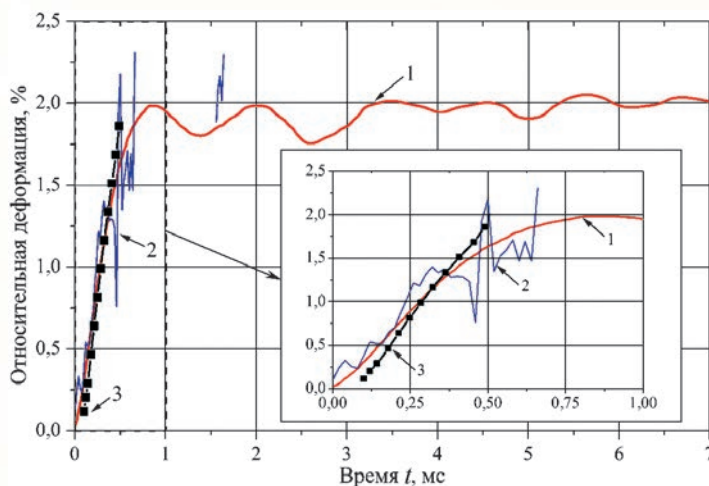
в протонный пучок (в тракт ионопровода протонного ускорителя), являются радиографические окна для ввода-вывода зондирующего излучения. Их «оптическая» толщина должна быть минимальной с целью уменьшения паразитного кулоновского рассеяния протонов и, вместе с тем, достаточной для гарантированного удержания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



Регистрация движения металлического лайнера в среде гелия



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.

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