

ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ

УНУ «Экспериментальный комплекс «Сфера» (УНУ «Сфера»)

на 2025-2027 гг.

1 Концепция развития УНУ «Сфера»

Концепция развития УНУ «Сфера» состоит в создании экспериментального комплекса, для проведения исследований физико-химических процессов при горении, детонации и ударном сжатии газообразных и конденсированных сред в широком диапазоне давлений и температур с использованием уникального оборудования, основополагающим элементом которого является взрывная камера 13ЯЗ диаметром 12, рассчитанная на взрыв до 1000 кг ТНТ. В кооперации с другими научными организациями с использованием этого экспериментального комплекса можно решать на передовом уровне фундаментальные научные и прикладные проблемы по следующим направлениям:

- механизмы и закономерности возбуждения и развития взрыва в различных средах;
- физико-химические свойства вещества при экстремальных давлениях и температурах;
- химическая физика ударных и детонационных волн;
- самовоспламенение, горение, взрыв и детонация газовых смесей в больших объемах;
- регулирование процессов горения и взрыва газовых смесей с помощью химически активных добавок, использования наноразмерных и механоактивированных компонентов;
- реологические свойства конденсированных сред;
- взрывные процессы в химически активных средах;
- безопасность водородной и ядерной энергетики, газовой, химической и угольной промышленности.

УНУ «Сфера» дает возможность комплексного проведения экспериментальных исследований в области физики высоких концентраций энергии, а ее уникальность обусловлена тем фактом, что действующих взрывных камер, подобных 13ЯЗ, в мире не существует. С использованием оборудования УНУ «Сфера» были выполнены важнейшие фундаментальные исследования процессов детонации, физико-химических превращений в ударных волнах, исследования в области физики и механики разрушения, физики твердого тела и пластичности, газодинамики, исследование теплофизических и электрофизических свойств вещества при высокой концентрации энергии, в том числе в экстремальных состояниях, реологических процессов.

Техника ударных волн является мощным инструментом изучения свойств материалов при экстремально высоких плотностях энергии. В ударных и детонационных волнах достигаются чрезвычайно высокие давления и температуры, а процессы протекают с очень высокой скоростью. Эти обстоятельства открывают уникальные возможности для исследований в области физики высоких плотностей энергии, физики фазовых, полиморфных и химических превращений, физики прочности и пластичности.

Концепция также включает:

- Научно-методическое и приборное обеспечение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, проводимых организациями Российской Федерации в рамках федеральных, целевых и ведомственных программ, научных программ Минобрнауки, РФФИ и других учреждений, организаций, имеющих государственный статус, а также в соответствии с тематическими планами организаций, финансируемых из федерального бюджета.

- Предоставление организациям возможности использования методов научных исследований, разработанных и освоенных УНУ «Сфера».

- Развитие материально-технической базы УНУ «Сфера» путем дооснащения имеющихся специализированных комплексов и лабораторий новым научным оборудованием

и модернизации методов выполнения измерений для обеспечения и развития исследований в форме совместного пользования научным оборудованием.

– Подготовка кадров высшей квалификации в области физики высоких плотностей энергии.

2 Мероприятия по развитию материально-технической базы УНУ «Сфера»

В состав УНУ «Сфера» помимо уникальной сферической взрывной камеры 13ЯЗ входит цилиндрическая взрывная камера ВБК-2 объемом 110 м³, рассчитанная на взрыв до 50 кг ТНТ. Ствольная установка "Стрела-2М" для ускорения снарядов до скоростей около 1 км/с. Ударные трубы различного диаметра для исследований физико-химических процессов в газовых смесях.

УНУ «Сфера» обладает научным оборудованием, позволяющим вести исследования по перечисленным выше направлениям. Однако развитие науки и техники ставят перед учеными, работающими на УНУ «Сфера» новые задачи, для решения которых необходимо приобретение ряда новых приборов и оборудования.

Для расширения работ в области физики экстремального состояния вещества, физики и механики разрушения, физики твердого тела на УНУ «Сфера» запущен в эксплуатацию четырехканальный измерительный комплекс на основе лазерного интерферометра VISAR КДНИ-532-7. Для визуализации изучаемых процессов взрывная камера ВБК оснащена двумя 16-кадровыми высокоскоростными камерами CORDIN-222 и Наногейт-22/16 с длительностью экспозиции от 5 нс.

Для выработки научных рекомендаций в области безопасности при работе с горючими газами (водород, метан), а также решения ряда вопросов газодинамики горения в больших объемах требуется проведение испытаний в условиях, моделирующих реальные объекты. Для определения газовых потоков и движения ударных волн требуется большое количество датчиков импульсного давления на широкий диапазон параметров и соответствующее количество вторичных приборов – блоков питания и осциллографов.

Датчики импульсного давления на весь диапазон исследуемых параметров, а также цифровые осциллографы, работающие в гигагерцовом диапазоне, в России не выпускаются. Поэтому предполагается дополнительно приобрести импортное оборудование с необходимыми характеристиками.

Для исследования вопросов эволюции сферического пламени и процессов горения газовых смесей в больших объемах необходимо приобрести дополнительные приборы для измерения параметров проходящих волн, изготовить специальные устройства с возможностью крепления приборов в различных местах камеры 13ЯЗ (на различной высоте и под различными углами). Эти устройства должны вносить минимальные искажения в движение газовых потоков.

Для работ по безопасности в области водородной энергетики предполагается исследовать турбулентную диффузию водорода в объемах, моделирующих реальные помещения. Для этого требуется приобрести датчики концентрации водорода. Отечественные предприятия выпускают датчики, измеряющие концентрацию водорода до 10% (об.), а для решения поставленных задач большой интерес представляет исследование смесей не только с концентрацией водорода 10% (об.), но и с более высоким содержанием водорода, а также использование других горючих газов.

Предполагается модернизировать систему приготовления газовых смесей в камере 13ЯЗ, так как предыдущая эксплуатация выявила ряд недостатков, связанных с добавками ингибиторов в газовые смеси и ограничивающих ее эффективность. Для этого надо приобрести кориолисовый расходомер Promass (фирма Endress+Hauser, Швейцария), являющийся наиболее точным в настоящее время в мире и измеряющий массу проходящего газа, и расходомер Prowill, измеряющий объем проходящего газа. Такая высокая точность необходима для работ по химическому регулированию процессов горения, когда добавка 0,2-0,5 % (об.) ингибирующего газа может кардинальным образом изменить характер горения.

Для создания сложных экспериментальных установок на должном уровне и взрывных сборок требуется новое современное станочное оборудование и инструмент.

Предполагается дальнейшее развитие системы визуализации исследований, проводимых в камерах ВБК-2 и 13ЯЗ. Визуализацию предполагается проводить с помощью современных высокоскоростных CCD видеокамер.

Для оперативного определения состава газовых смесей предполагается приобрести газовый хроматограф типа ФГХ-1.

3 Анализ полученных с использованием научного оборудования УНУ «Сфера» результатов проведения исследований

За последние годы большое внимание уделялось исследованию нестационарного горения водородно-воздушных смесей. Режимы нестационарного горения газовых смесей представляют собой вторичные очаги горения и взрыва, образовавшиеся в результате сжатия смеси ударными волнами, порожденными первичным фронтом пламени, и усилившимися при прохождении через реакционную среду и фронт пламени.

Режимы нестационарного горения изучены крайне мало, особенно в больших объемах. Исследования нестационарного горения, проведенные в ОИВТ РАН во взрывной камере 13ЯЗ диаметром 12 м, показали исключительную важность этих режимов для проблем безопасности при работе с водородом. В таких объемах, в отличие от детонации, для возбуждения которой требуются значительные энергетические воздействия, нестационарное горение может развиваться от сравнительно слабого источника энергии за счет многократного прохождения ударных волн через реакционную среду и фронт пламени. Это делает нестационарное горение особенно опасным. При инициировании стехиометрической водородно-воздушной смеси при начальном давлении 1,4 атм искрой, энергия которой была 6 Дж, на внутренней поверхности камеры было зарегистрировано давление 190 атм, что на порядок превышает давление Чепмена-Жуге во фронте стационарной детонации.

Одной из важнейших задач изучения горения газовых смесей в больших объемах является эволюция турбулентного сферического пламени предварительно перемешанной экзотермической газовой смеси. Эта задача является фундаментальной проблемой химической физики и имеет большое практическое значение. В первую очередь это связано с вопросами самопроизвольного перехода турбулентного сферического горения в детонацию. Возможность такого перехода, несмотря на длительный срок исследования, до сих пор является спорной.

Для решения прикладных задач проведены измерения упругопластических и прочностных свойств широкого круга металлов и сплавов, в том числе – конструкционных и броневого, твердых полимеров и композитных конструкционных материалов. Разработаны реологические модели и получены определяющие соотношения для расчета сопротивления деформированию и разрушению и кинетики накопления повреждений при пробивании и взрыве.

Исследования экстремальных состояний вещества – это одна из областей науки, в которой Россия продолжает сохранять лидирующие позиции.

Техника ударных волн является мощным инструментом изучения свойств материалов при экстремально высоких скоростях деформирования с хорошо контролируемыми условиями нагружения. Методология этого научного направления основана на связи регистрируемых в опытах параметрах течения вещества с происходящими в нем физическими и химическими процессами. Современный прогресс в исследованиях высокоскоростной деформации, разрушения и физико-химических превращений в ударных волнах в большой мере связан с разработкой современных методов измерений волновых профилей с высоким пространственным и временным разрешением.

К настоящему времени в УНУ «Сфера» методами ударного сжатия выполнен целый ряд исследований состояния металлов и наиболее распространенных химических соединений в обширной области фазовой диаграммы при давлениях, достигающих нескольких десятков миллионов атмосфер. Однако для экспериментов с ударными волнами характерны не только

широкий диапазон достижимых давлений и температур, но также чрезвычайно высокие скорости их изменения. Эти обстоятельства открывают уникальные возможности для исследований в области физики фазовых и полиморфных превращений, физики разрушения, прочности и пластичности. Особенно интересным направлением, в последнее время является исследование возникновения и развития физико-химических превращений в пористых средах и реакционноспособных смесях при ударно-волновом нагружении. Из-за высокой неоднородности гетерогенных материалов обычные методы исследований не позволяют получать достаточно точные данные о параметрах протекающих процессов.

Фронт ударной волны в композиционных пористых материалах и смесях имеет существенные неоднородности, разрушающие отражающую поверхность, что приводит к необходимости использования достаточно толстых промежуточных материалов (фольг), и, соответственно, существенному снижению временного разрешения и точности измерений, а в случае некоторых высокопористых материалов вообще приводит к невозможности получения данных. Все это существенно ограничивает возможности ОИВТ РАН в получении экспериментальных данных для описания поведения неоднородных материалов при высокоскоростных импульсных нагрузках. Эта проблема может быть решена за счет использования измерительного комплекса на основе метода PDV (Photon Doppler Velocimetry), который широко используется во всех передовых лабораториях США (LANL, LLNL и др.). Метод позволяет не только регистрировать скорость поверхности материалов в нескольких точках, но также измерять распределение скоростей отдельных частиц при вылете с поверхности ударно-сжатого материала.

4 Перечень планируемых к закупке научных приборов, оборудования и материалов

В целях развития УНУ «Сфера» предполагается приобрести следующее оборудование и материалы:

- Осциллографы с полосой пропускания более 2 ГГц (типа Tektronix или LeCroy)
- Осциллограф с полосой пропускания более 8 ГГц для интерферометра PDV
- Двухканальный интерферометр PDV - - лазерный измерительный комплекс прямого гетеродинного преобразования сигналов на основе волоконного лазера с длиной волны 1.55 мкм
- Высокоточный кориолисовый расходомер Promass 80A04 или аналогичный
- Датчики импульсного давления PCB 113B36
- Датчики импульсного давления PCB 113B34
- Датчики импульсного давления PCB 113B32
- Шары-зонды
- Водород (в баллонах)
- Метан (в баллонах)
- Цифровую высокоскоростную видеокамеру с частотой кадров более 300 000 к/с (типа Phantom)
- Газовый хроматограф ФГХ-1

5 Обеспечение достоверности (единства) измерений

Спецификой измерений, проводимых на УНУ «Сфера», является то, что измерения основных параметров проводятся за весьма короткие промежутки времени – от наносекунд до миллисекунд. Обеспечение достоверности (единства) измерений достигается покупкой сертифицированного оборудования для регистрации основных параметров. Ремонт оборудования осуществляется по возможности на фирмах-производителях с выдачей сертификационных документов.

6 Мероприятия по совершенствованию имеющихся и развитию новых методов выполнения измерений

Совершенствование существующих и разработка новых методик исследования смесей базируется на применении самой современной техники. Планируется разработка методики для исследования эволюции турбулентного сферического пламени и изучения горения газовых смесей в больших объемах, заключающаяся в одновременной регистрации движения ударных волн и фронта пламени в широкой области параметров.

Существующая высокоскоростная съемочная техника позволяет проводить визуализацию быстропротекающих процессов, которые имеют место во взрывных экспериментах. Но в настоящее время появились новые потребности в повышении пространственного и временного разрешения. Эти проблемы будут решаться с приобретением более современной высокоскоростной техники, совершенствования, переоснащения и дооснащения существующих методик исследования термодинамических, реологических свойств при экстремальных условиях.

7 Мероприятия по расширению и совершенствованию сферы услуг УНУ «Сфера»

УНУ «Сфера» оказывает значительное количество различных услуг. К их числу относятся испытания взрывных камер, испытания взрывомагнитных генераторов, отладка и работа с мобильным испытательным комплексом, исследовательские работы по сварке взрывом, испытания каталитических дожигателей водорода, испытания новых ВВ.

В процессе работ происходит постоянное совершенствование сферы услуг. Этому способствует то обстоятельство, что почти каждое последующее обращение по одной и той же услуге содержат элементы новизны, требующие определенных доработок в методическом или в приборном плане. Такие доработки осуществляются с учетом имеющегося опыта и приводят к заметному улучшению качества услуги.

Прогресс в исследованиях упругопластических и прочностных свойствах материалов при ударно-волновом нагружении в значительной мере связан с разработкой и созданием лазерного Допплеровского измерителя волновых профилей скорости с высоким пространственным и временным разрешением. С использованием этого прибора проведены многочисленные измерения динамического предела текучести и разрушающих напряжений для разнообразных материалов.

8 Прогноз на ближайшую перспективу потребностей в услугах УНУ «Сфера»

За последнее время значительно увеличилась потребность в исследованиях и испытаниях в области взрывных и высокоэнергетических воздействий и технологий. Это связано, с одной стороны, с тем, что техника ударных волн является мощным инструментом изучения свойств материалов при экстремально высоких скоростях деформирования с хорошо контролируемыми условиями нагружения. С другой стороны, крупные природные и техногенные катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС, взрывы метана на шахтах, водорода на АЭС «Фукусима» в Японии ставят новые задачи, решать которые можно лишь проводя соответствующие эксперименты со значительным энерговыделением. Развивается детонационный синтез новых сверхтвердых материалов и наноматериалов. Создаются новые взрывчатые вещества. Наличие в составе УСУ «Сфера» взрывных камер с широким диапазоном размеров и количества взрываемого вещества позволяет проводить работы по испытанию новых взрывчатых веществ и решать многочисленные задачи по безопасности при работе с горючими газами (водород, метан).

Исследования ударно-волновых и детонационных явлений создают теоретические основы их применений в оборонной технике и промышленности, стимулируют разработку новых технологий, а также создают условия для внедрения современных методов проектирования технических устройств и технологий с применением взрыва и высокоскоростного удара.

Один из распространенных инструментов современных исследований и современных методов проектирования и разработки технологий и устройств с применением импульсных

источников энергии представляет собой компьютерное моделирование. При современном уровне развития вычислительной техники и численных методов механики сплошной среды расчеты такого рода являются одним из основных «потребителей» результатов экспериментальных и теоретических исследований. При этом индивидуальные свойства конструкционных материалов, продуктов взрыва и других веществ описываются термодинамическими уравнениями состояния и набором определяющих соотношений, которые характеризуют термодинамические, упругопластические, прочностные и кинетические свойства материалов и веществ. Как следствие, достоверность и точность расчетов определяются тем, насколько полны и точны наши знания о поведении и свойствах конкретных материалов и веществ при высоких давлениях, температурах и предельно высоких скоростях изменения этих параметров, а также тем, насколько полно и точно эти знания формализованы в виде уравнений состояния и определяющих соотношений.

В связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза и задачами астрофизики и планетологии будут расширены экспериментальные и теоретические исследования, электрофизических и оптических свойств водорода, дейтерия, воды, простейших углеводородов, а также вспомогательных материалов, используемых для проведения этих измерений (сапфир, алмаз и другие прозрачные диэлектрики) в мегабарном диапазоне давлений. С целью развития теории межчастичных взаимодействий в веществе при высоких температурах и плотностях будут продолжены исследования в области испарения, окрестности критической точки, и высокотемпературных состояний при мегабарных давлениях, а также в области стимулированных давлением фазовых переходов.

Эксперименты с ударными волнами позволяют получить сведения о наиболее фундаментальных прочностных свойствах материалов при напряженном состоянии, близком к всестороннему растяжению, и при отсутствии влияния поверхности тела и окружающей среды. Высокая скорость приложения нагрузки позволяет создавать повышенные напряжения в материале и тем самым активировать новые механизмы деформации и разрушения. Значимость исследований процессов неупругого деформирования и разрушения твердых тел при ударно-волновом нагружении определяется как уникальной возможностью исследований в области физики прочности и пластичности при наиболее высоких и надежно измеримых скоростях деформирования, так и разнообразными практическими потребностями, не ограниченные только ударными воздействиями. Малая длительность и высокие амплитуды ударной нагрузки позволяют достичь высоких перенапряжений в материале и тем самым перейти от рассмотрения единичных трещин к анализу эволюции рассеянных разрушений.

В связи с все более широким использованием методов компьютерного моделирования для проектирования боеприпасов, бронезащитных и других конструкций, проектирования промышленных взрывов и решения задач обеспечения безопасности следует ожидать, что исследования упругопластических и прочностных свойств конструкционных материалов, горных пород, а также взрывчатых веществ и топлив в ближайшее время будут продолжены с ориентацией на получение определяющих соотношений и создание соответствующих банков данных. В связи с медицинскими и технологическими применениями импульсной лазерной техники следует ожидать расширения исследований механических свойств при высокоскоростном воздействии на полимеры и биоматериалы. Особое внимание будет уделяться исследованию наноструктурных материалов различного типа как с точки зрения изучения фундаментальных механизмов их деформирования и разрушения, так и с точки зрения их прикладного применения в различных областях промышленности.

В ближайшее десятилетие следует ожидать значительного расширения применения техники ударных волн для решения задач материаловедения, физики прочности и пластичности. Дальнейшие исследования вариаций прочности на мезоуровне и выяснение механизма образования полос локализованного сдвига будут способствовать конструированию новых высокопрочных материалов и совершенствованию технологии их обработки. Выяснение деталей механизма хрупкого разрушения при сжатии будет способствовать продвижению в создании и применении сверхтвердых материалов,

прогнозированию землетрясений. В связи с широким использованием композитных материалов в качестве конструкционных (например – корпуса твердотопливных ракет) и защитных (в частности – в бронежилетах) становятся актуальными экспериментальные и теоретические исследования их высокоскоростного деформирования и разрушения.

Высокие давления и температуры, достигаемые при ударном сжатии твердых тел, могут вызывать в них фазовые переходы и полиморфные превращения. Наиболее интересной фундаментальной проблемой является вопрос о механизме высокоскоростного превращения. При ударном сжатии структурная перестройка в твердых телах может происходить за времена 10^{-9} – 10^{-7} с и менее. Исследования некоторых полиморфных превращений, таких, как превращение графита в алмаз, очевидно, являются практически важными и востребованными в связи с реализованными и потенциальными технологическими применениями.

В последнее время наблюдается рост числа обращений с просьбой оказания новых услуг на УНУ «Сфера». Как правило, на УНУ «Сфера» находится возможность для разработки и оказания таких услуг. С другой стороны, количество организаций, в которых возможно проведение взрывных работ, за последнее время значительно сократилось. Это свидетельствует в пользу того, что потребности в измерениях, исследованиях и испытаниях, проводимых на УНУ «Сфера», будет возрастать.

9 Мероприятия по подготовке научных кадров высшей квалификации

На УНУ «Сфера» постоянно работают аспиранты и дипломники МФТИ, МИФИ и МГТУ им. Баумана. В ближайшее время планируется увеличить их численность.

Руководитель УНУ «Сфера»
зав. лаб. №6.2 ОИВТ РАН
д.ф.-м.н.



А.Ю. Долгобородов