




РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



ТЕХНОЛОГИИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

экспериментальные
и расчетно-теоретические
исследования безопасности



Первый энергопереход состоялся в XIX веке, когда уголь массово вытеснил биотопливо.


Второй был вызван распространением нефти, третий — природного газа.

Мы живем в эпоху четвертого энергоперехода, который нацелен на значительное уменьшение углеродного следа, оказывающего отрицательное влияние на климат и экосистему планеты Земля.

МИР НАХОДИТСЯ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ДВИЖЕНИЯ К ЭКОНОМИКЕ БЕЗ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ВЫБРОСОВ

Именно по этой причине в настоящее время в мире делают ставку на возобновляемые источники энергии, наблюдается рост интереса к использованию водорода, как эффективного экологически чистого энергоносителя. Однако проблема обеспечения водородной безопасности все ещё остается актуальной.






Несмотря на почти вековую историю исследований, остаются «пробелы» в знаниях по аварийным процессам с масштабным истечением водорода. Об этом свидетельствуют произошедшие аварии на зарубежных площадках:

- взрыв стандартного трейлера с водородом Muskingum River Power Plant's Unit 5 в США 08.01.2007;
- взрыв резервуара с водородом Gangwon Technopark в Ю. Корее 24.05.2019;
- взрыв водорода на кремниевом заводе в США 19.12.2019.

2011

СВЕЖА В ПАМЯТИ АВАРИЯ НА АЭС ФУКУСИМА

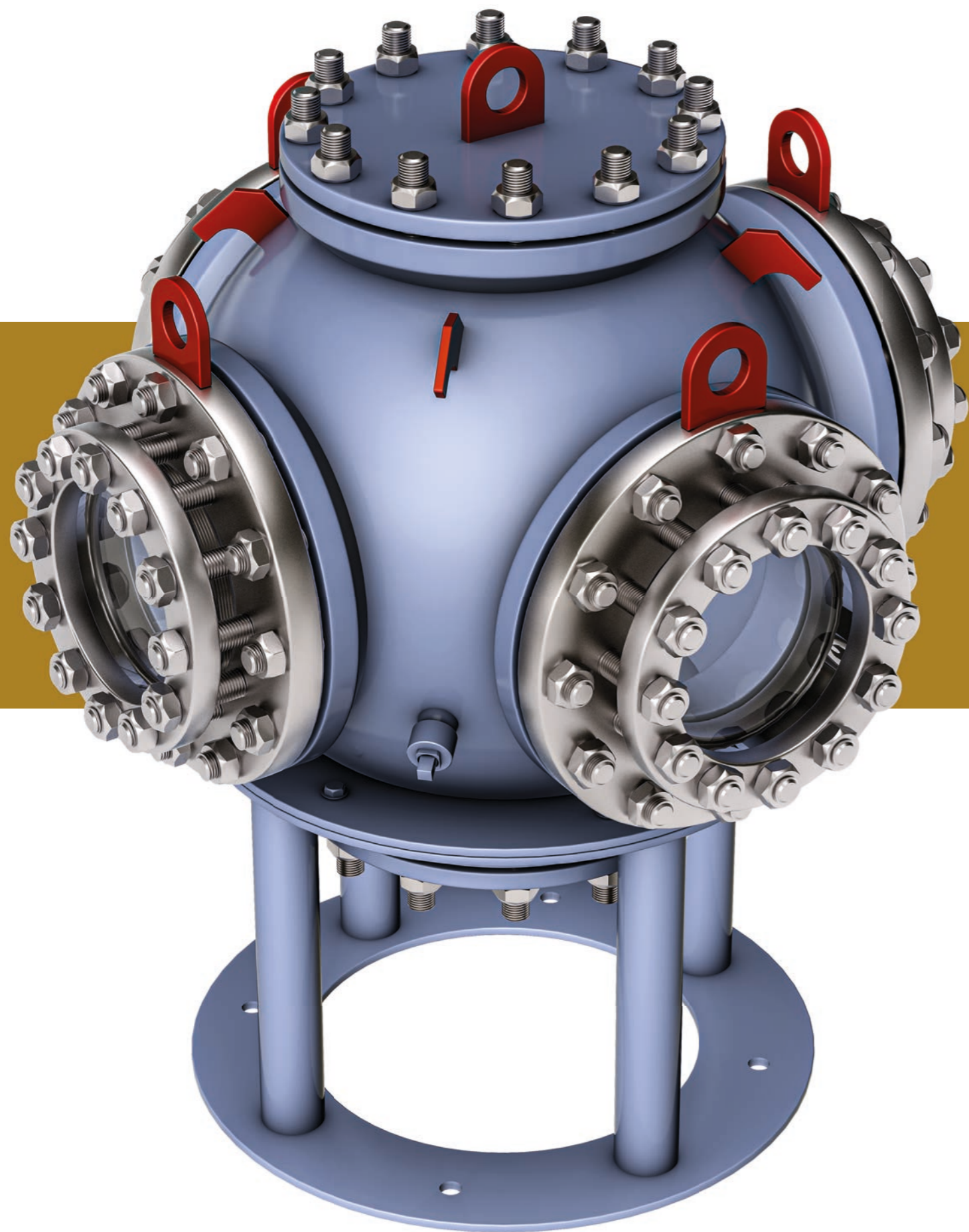


В РФЯЦ – ВНИИТФ создан и развивается экспериментальный комплекс для решения задач по обеспечению безопасности на объектах водородной энергетики.

В этом издании представлены лабораторные и «полигонные» установки, на которых наши экспериментаторы получают ценные результаты. Подчеркивается необходимость проведения расчетно-теоретических исследований.

С развитием водородной энергетики придется иметь дело с массовым производством, хранением, перевозкой и потреблением водорода, при этом необходимо создать культуру безопасности, такую как, например, в атомной промышленности. Разрабатываемые в настоящее время новые технологии для водородной энергетики слабо исследованы в вопросах безопасности. Для миними-

зации рисков аварий следует адаптировать нормативные документы и создать новые инструменты анализа пожаро- и взрывобезопасности. Для этого необходимы достоверные данные, которые можно получить только при наличии развитой экспериментальной и расчетной базы. Этими возможностями обладает РФЯЦ – ВНИИТФ.

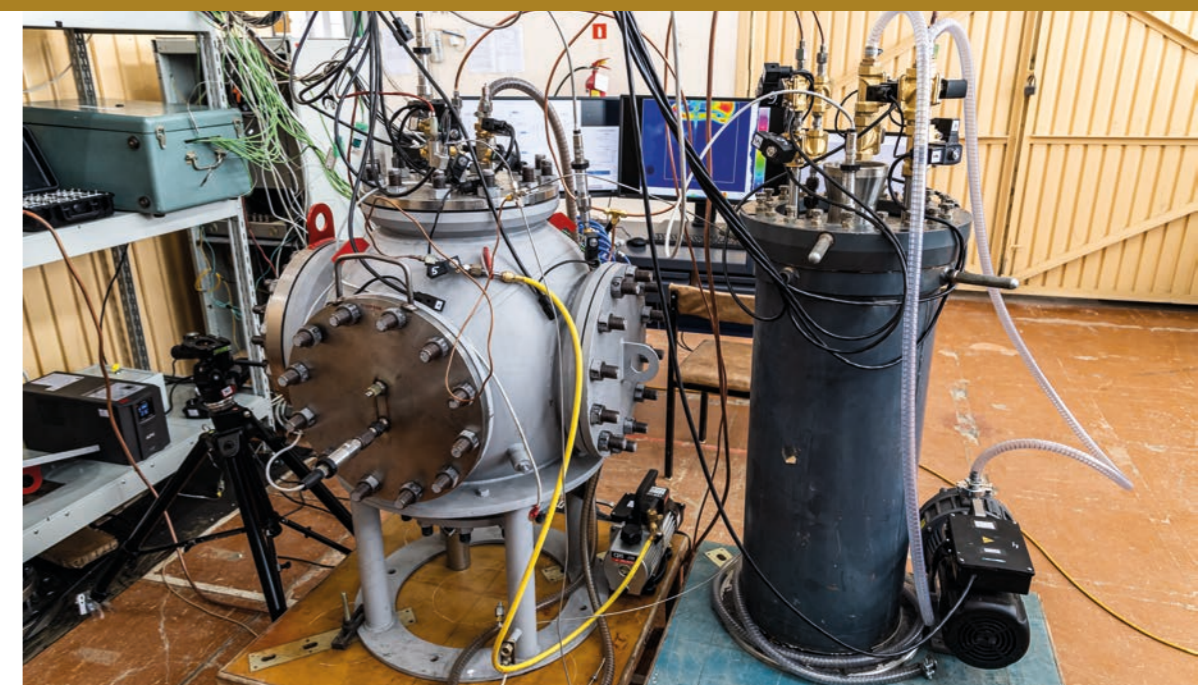


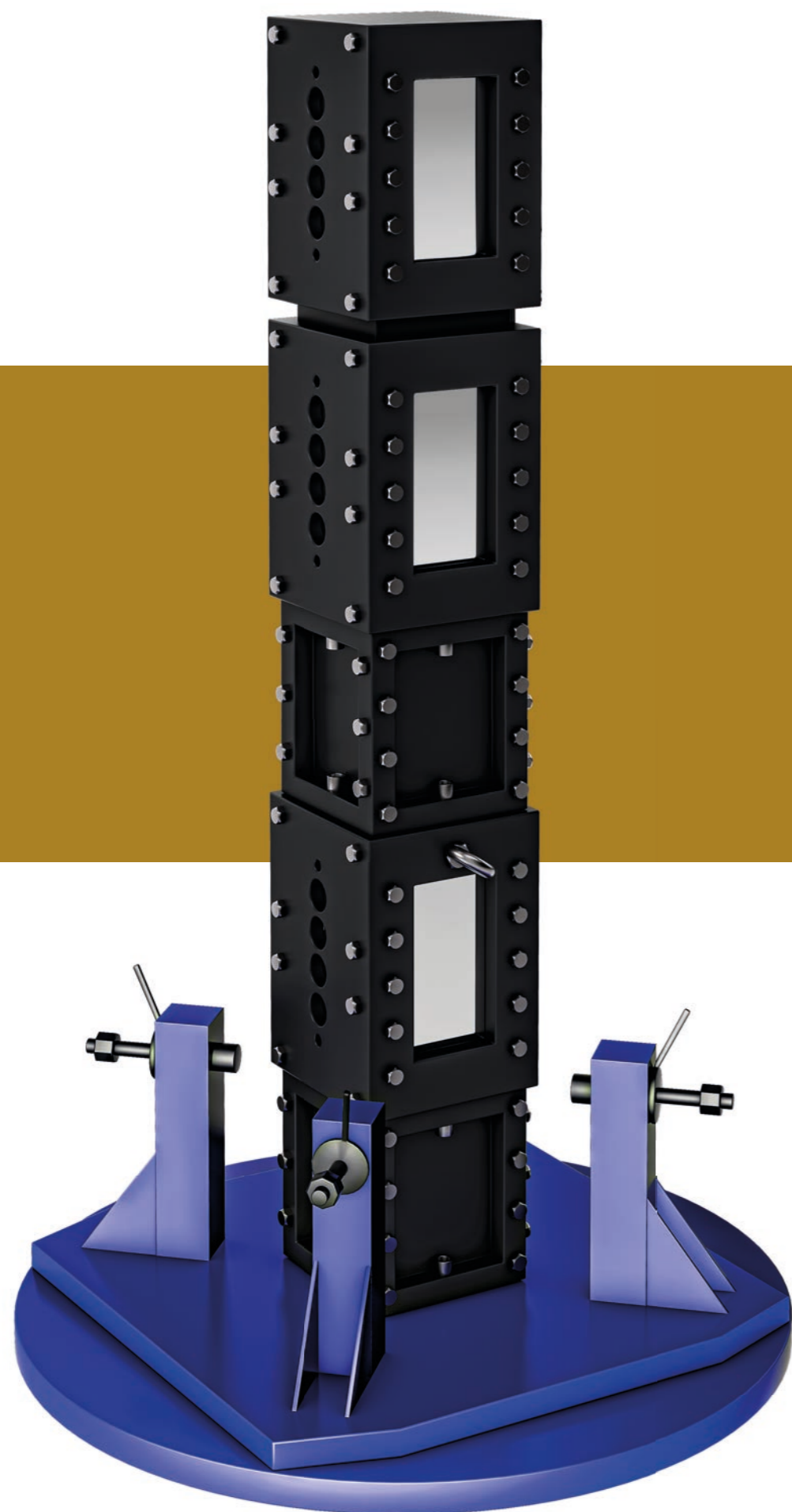
КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Комплекс КЭИП предназначен для экспериментального определения концентрационных пределов воспламенения и распространения пламен в смесях водород-метан-монооксид углерода-водяной пар-воздух при различных температурах и давлениях. Комплекс включает в себя пять модификаций камер различных форм и объемов от 2 до 100 литров. В двух модификациях

предусмотрены окна с сапировыми стеклами для визуализации процессов горения газовых смесей.

Результаты экспериментов важны для оценки пожаро-взрывобезопасности смесей, характерных для площадок производства и хранения водорода.



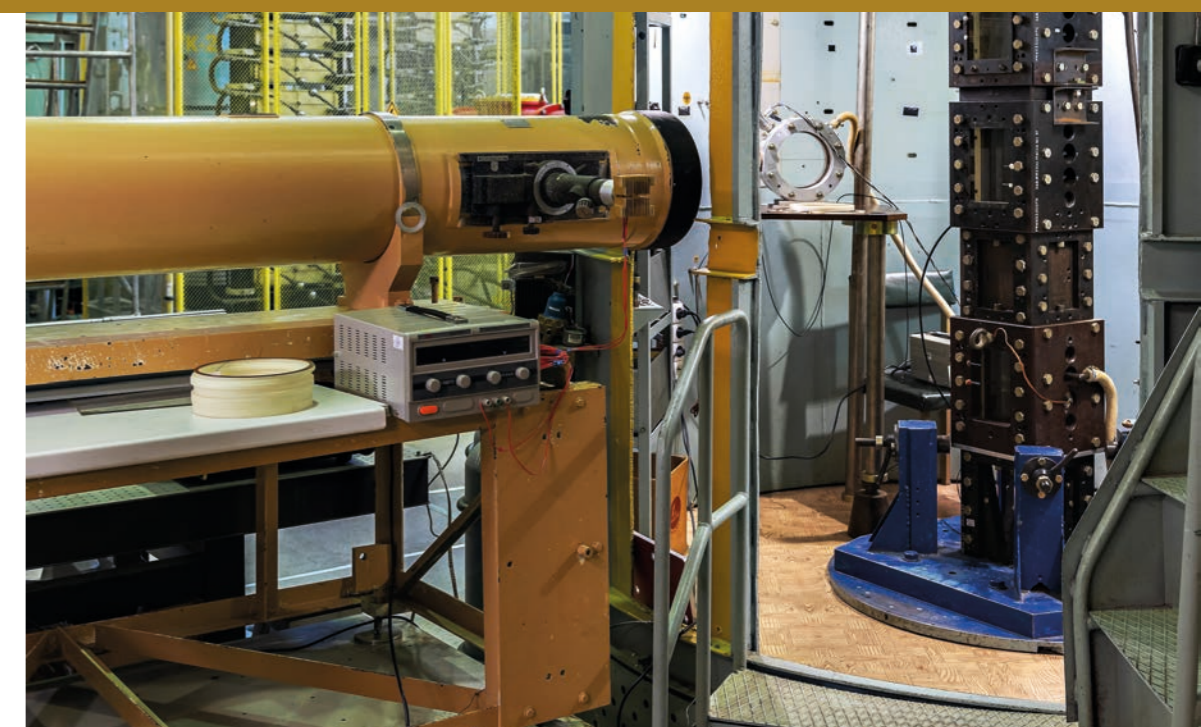


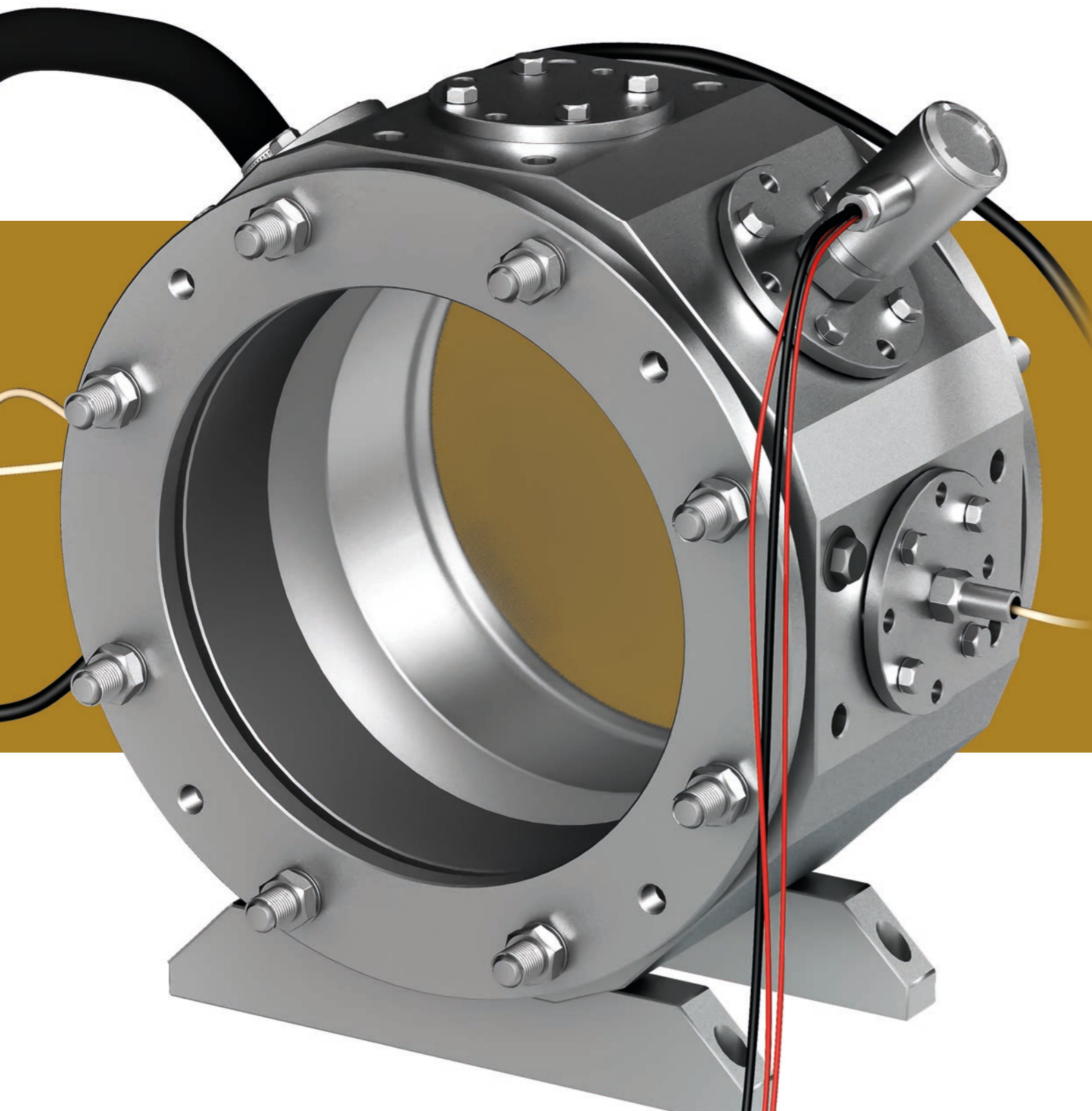
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УДАРНАЯ ТРУБА

Стенд МУТ — это вертикально ориентированная труба квадратного сечения 138 × 138 мм с набором высоты трубы до 4 м. Труба состоит из отсеков, в которых имеются оптические стекла для визуального наблюдения за фронтом пламени с помощью теневого прибора, который визуализирует пламя в видимом спектре.

На стенде МУТ:

- определяются пределы распространения пламен вверх и вниз в перемешанных водородно-воздушных смесях, при котором возникает риск взрывного протекания горения;
- исследуются параметры отверстий, при которых происходит гашение пламен в перемешанных водородно-воздушных смесях, что может быть полезным при проектировании устройств для локализации процесса горения.



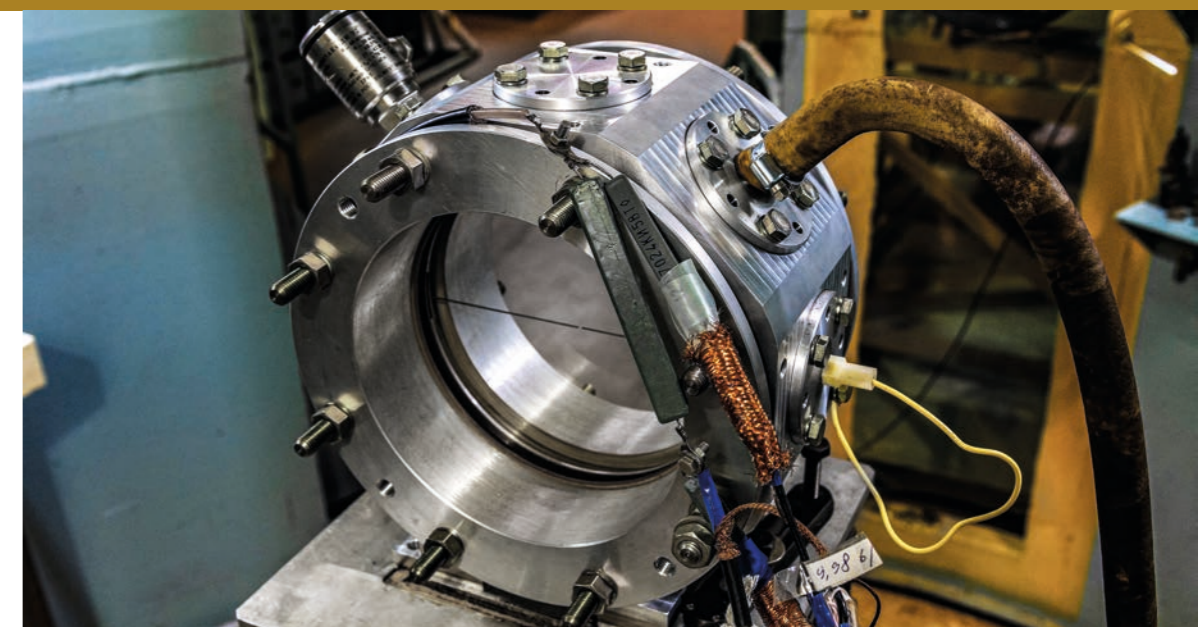


МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УДАРНАЯ ТРУБА ТРАНСФОРМИРУЕМАЯ КАМЕРА

Стенд МУТ-ТК — камера диаметром ≈ 200 мм, состоящая из двух прозрачных цилиндрических окон из кварцевого стекла с изменяемым зазором между стеклами. На лабораторном стенде МУТ-ТК исследуются процессы горения водородовоздушных смесей в условиях ограниченного пространства. Подобные условия могут наблюдаться в матричных ячейках топливных элементов или в электролизных установках. Данные экспериментов позволяют оценить влияние геометрии и теплоотдачи в стенки на характер распространения фронтов пламени.

На стенде МУТ-ТК:

- экспериментально исследуются процессы горения водородовоздушных смесей в условиях ограниченной конвекции;
- определяются предельные величины зазора между пластинами из кварцевого стекла, при котором происходит затухание пламени или переход горения от пламени с характерными двухмерными структурами в свободное пламя.





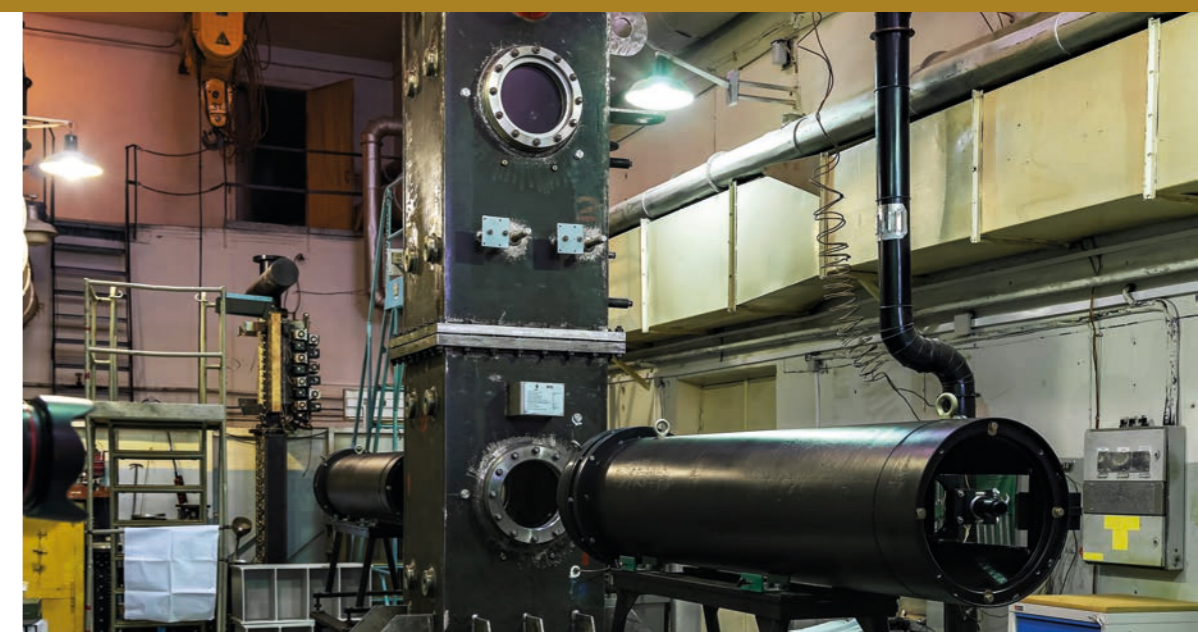
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УДАРНАЯ ТРУБА ПРОЧНАЯ КАМЕРА

В установке МУТ-ПК исследуются процессы горения водородосодержащих смесей с учетом масштабных эффектов с детальной визуализацией фронтов горения. Установка представляет собой трубу квадратного сечения 600 × 600 мм длиной 3 м.

На установке МУТ-ПК:

- проведены реперные эксперименты по исследованию горения обедненных водородно-воздушных смесей. Отработана система визуализации пламени в ультрафиолетовом спектре с помощью электронно-оптического преобразователя и скоростной видеокамеры.

Задачами экспериментальных исследований на установках семейства МУТ являются получение данных о процессе развития и распространения фронта пламени с последующим сравнением результатов с численными расчетами для верификации программных кодов, а также выявление характерных особенностей горения смесей и их различий для разных масштабов.



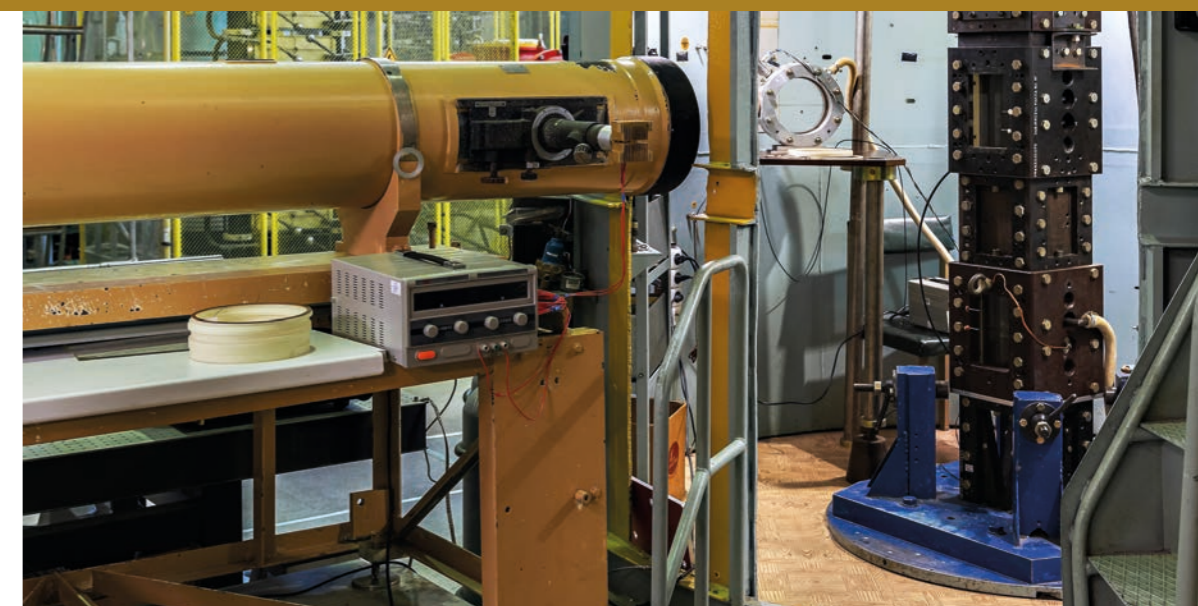


ТЕНЕВОЙ ПРИБОР

При помощи теневых приборов получают теневые изображения шлирен-методом. По чувствительности шлирен-метод превосходит другие, в том числе интерференционные методы. Шлирен-метод позволяет увидеть любое изменение плотности в прозрачных средах.

Данный метод позволяет увидеть изменение плотности в прозрачных средах и наблюдать конвекцию.

Шлирен-метод широко применяется в экспериментальных исследованиях газодинамических течений в ударных и аэродинамических трубах, перемешивания газов, процессов теплообмена, баллистики и т.п., позволяя повысить информативность и достоверность получаемых экспериментальных результатов.



СТРУЯ

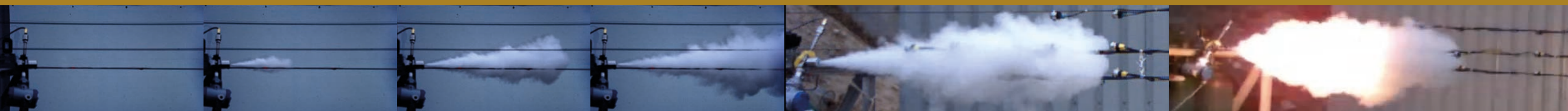
На полигонном стенде «СТРУЯ» проводится исследование струйных истечений из сосудов под давлением, в том числе с горением.

Основным результатом экспериментов являются данные по зонам образования взрывоопасных облаков и безопасным расстояниям для персонала и оборудования, в том числе в целях снижения риска каскадных аварий при плотном размещении на промышленных площадках ресиверов, баллонов или трубопроводов.

СТРУЯ – 700

Современные газовые баллоны могут хранить водород под давлением до 700 атм. Для оценки воздействий при разгерметизации таких баллонов в РФЯЦ – ВНИИТФ адаптируется легкогазовая пушка.

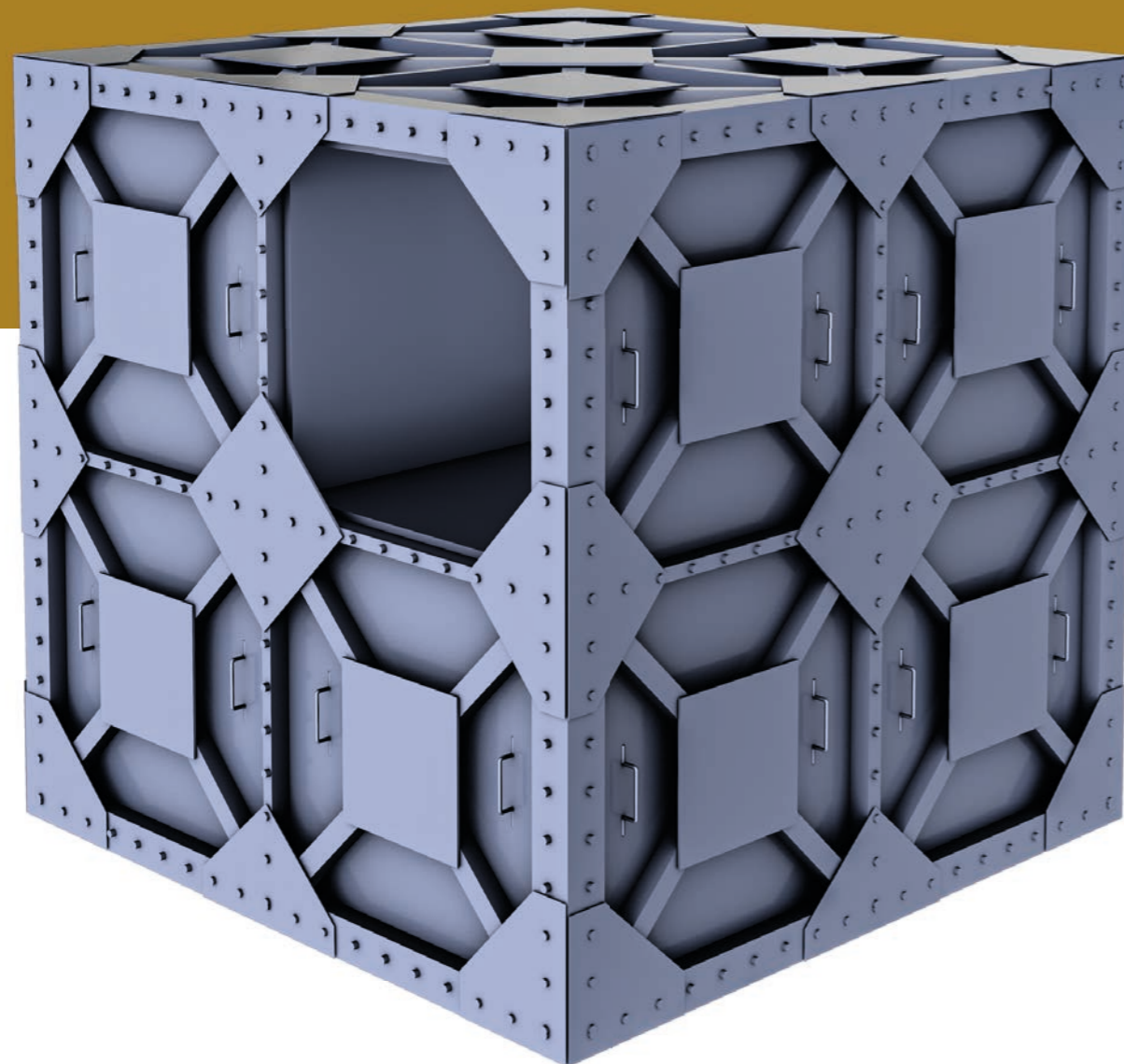
На установке, помимо зоны разлета газовой струи, будут определены параметры её излучения в случае горения, а также условия самовоспламенения.

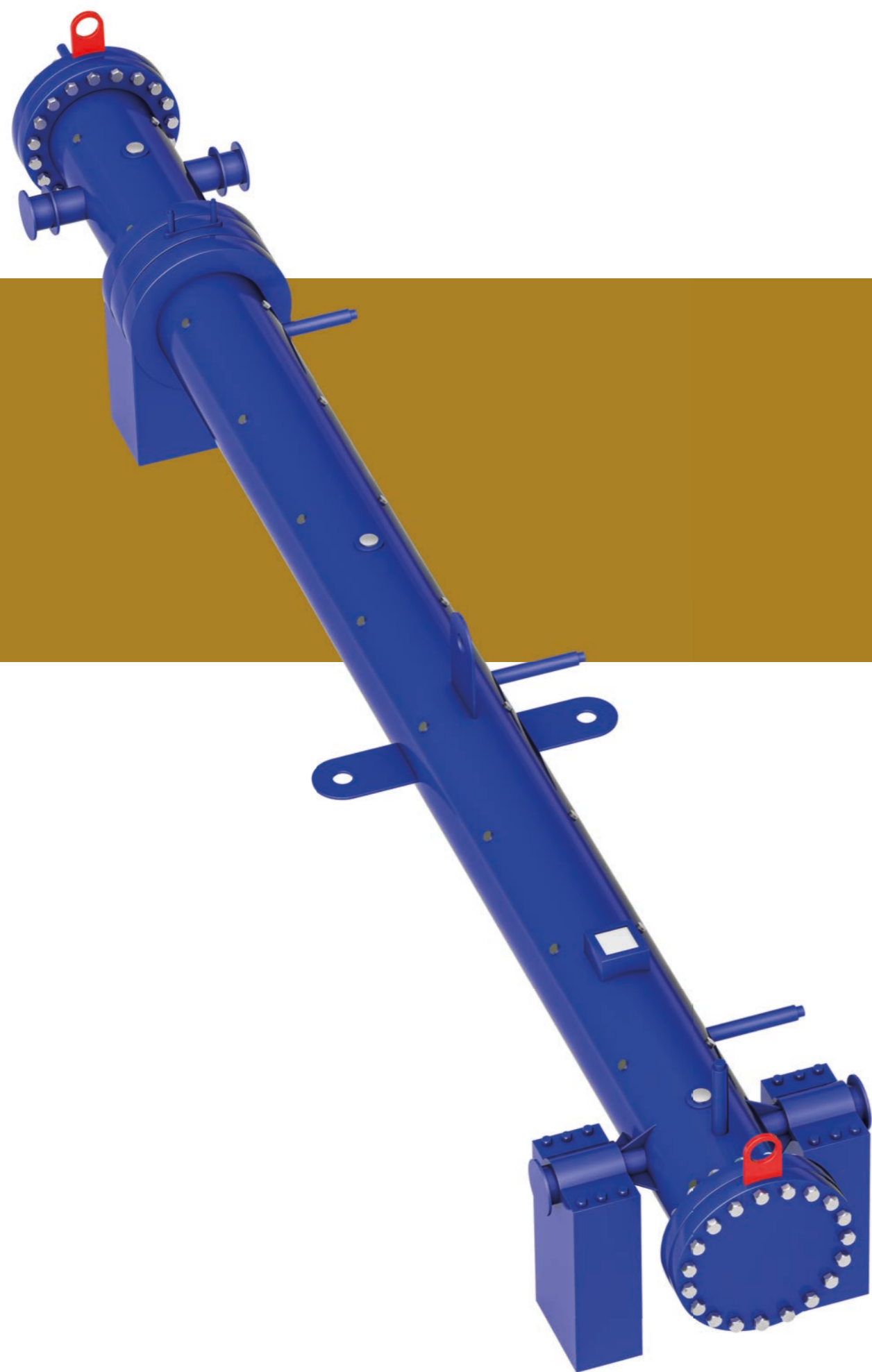


БОЛЬШОЙ МАКЕТ ЛЕГКИЙ

Стенд БМ-Л предназначен для исследования процессов распространения, вентилирования и горения водородосодержащих смесей. Данная установка представляет собой полый куб размером 2 × 2 × 2 м, с вентиляционными отверстиями сверху и снизу.

Результаты экспериментов представляют интерес для верификации расчетных кодов, которые необходимы для оптимизации вентиляционных систем с целью снижения опасности взрывов при разгерметизации баллонов с водородом или в случае аварий на электролизном участке производства водорода.



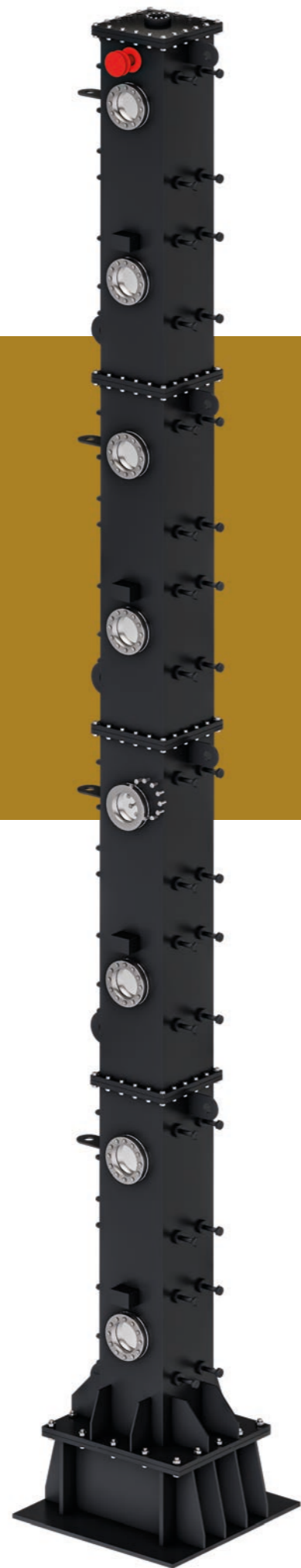


БОЛЬШОЙ МАКЕТ ТРУБА

Установка БМ-Т — это труба диаметром 325 мм и длиной 6 м. В ней проводятся исследования процессов ускорения пламен, которые могут приводить к значительному повышению давления, что является определяющим фактором степени разрушений объектов при взрывах.

Уникальность установки заключается в возможности проведения экспериментов в горизонтальном и вертикальном положении трубы. В прошлом году впервые в мире обнаружено влияние гравитации на смещение предела ускорения пламен в смеси водород-воздух.



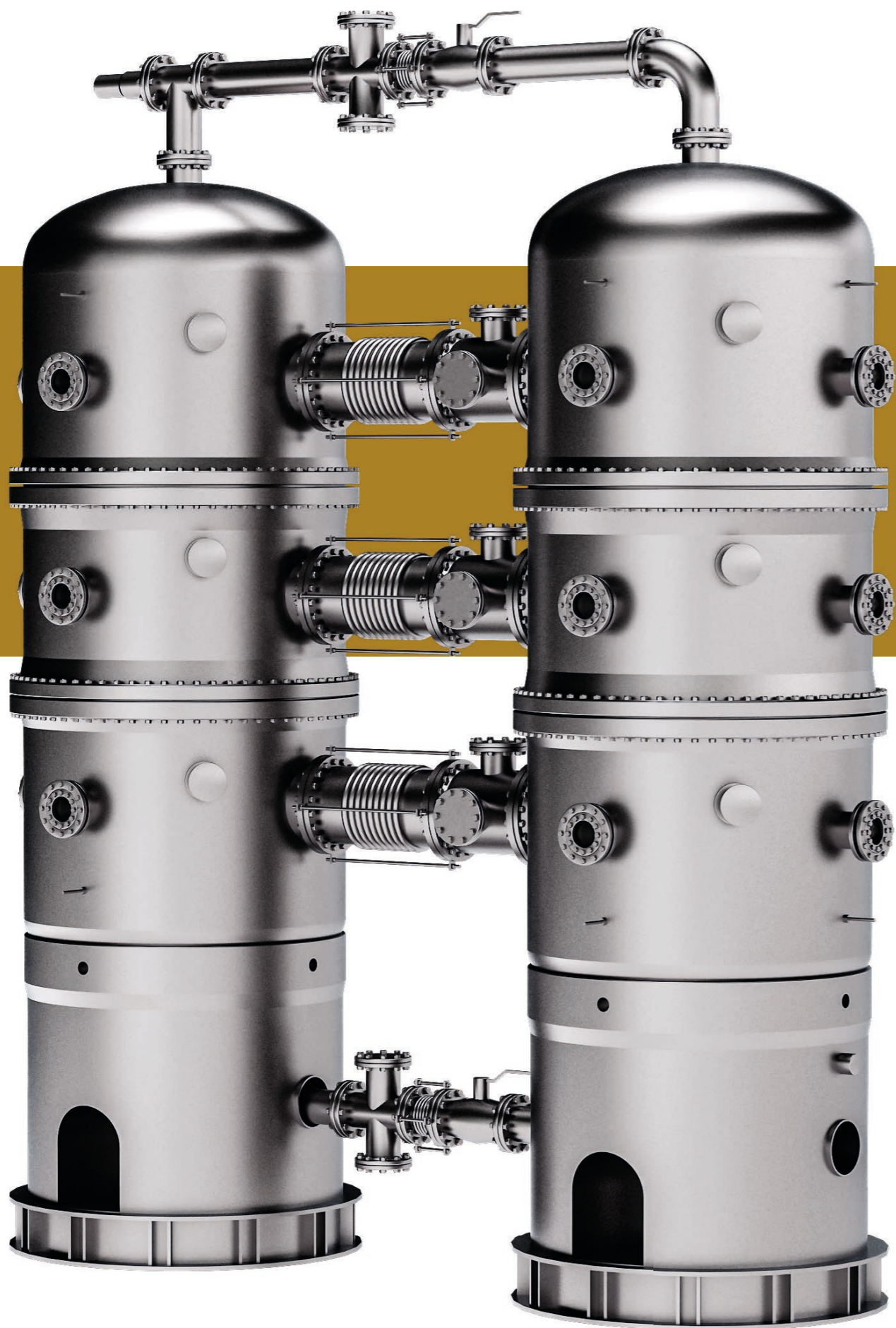


БОЛЬШОЙ МАКЕТ КАНАЛ

Установка БМ-К – это труба с квадратным сечением 600 × 600 мм длиной 12 м. На ней определяются отличия параметров горения равномерно перемешанных и неоднородных по пространству или стратифицированных смесей. Актуальность таких исследований обусловлена тем, что вероятность равномерного перемешивания истекающего горючего газа с атмосферой при аварии весьма мала. Результаты экспериментов необходимы также для верификации моделей горения.

Установка позволит определить отличия параметров горения однородных и стратифицированных смесей. Результаты экспериментов также полезны для верификации моделей горения.





БОЛЬШОЙ МАКЕТ ПРОЧНЫЙ

Установка БМ-П, состоящая из двух камер высотой 5 м, диаметром 2 м, соединенными между собой переходными трубами и сильфонами. В установке исследуется распространение и горение водородосодержащих парогазовых смесей, которые могут образовываться при тяжелых авариях на атомных станциях с водо-водяными энергетическими реакторами.

В настоящее время установка задействована для испытаний рекомбинаторов – устройств для снижения концентрации водорода в смеси под защитной оболочкой реактора.



ЗДАНИЕ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НОВЫХ УСТАНОВОК

На одной из площадок РФЯЦ — ВНИИТФ было построено утепленное здание для размещения в нем новых уникальных установок для проведения масштабных испытаний технологических решений при производстве и хранении водорода. В этом году будет изготовлена установка БМ-У (Большой Макет — Универсальный), в которой будут отработаны аварийные сценарии при разгерметизации крупных объектов водородной инфраструктуры — газгольдеров, ресиверов, конверсионных аппаратов и др.

В здании будет размещен участок электролизного производства водорода в целях оптимизации отечественной технологии электролиза.



На безопасном удалении от здания на открытом пространстве уже в этом году будут размещены стенды для исследований криогенных проливов, взрывных воздействий при крупных выбросах водорода, стенды для испытаний водородных баллонов.

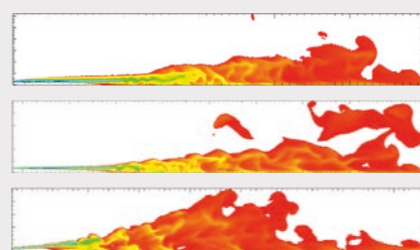
В ближайшей перспективе перечисленные установки и стенды будут использоваться для испытаний в целях сертификации новых российских технологий водородной энергетики.

ИНСТРУМЕНТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

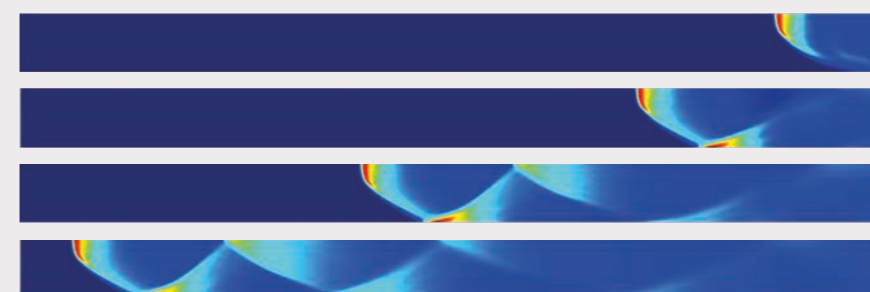
Широкий спектр инструментов численного моделирования, разработаемый и применяемый в РФЯЦ – ВНИИТФ, позволяет проводить трехмерные вычислительные эксперименты в различных постановках, в том числе в труднореализуемых при натурном экспериментальном исследовании. Математические модели, алгоритмы и реализованные на их основе комплексы программ постоянно дополняются и совершенствуются во

многом благодаря уникальной возможности тесного сотрудничества разработчиков и экспериментаторов в рамках единой площадки.

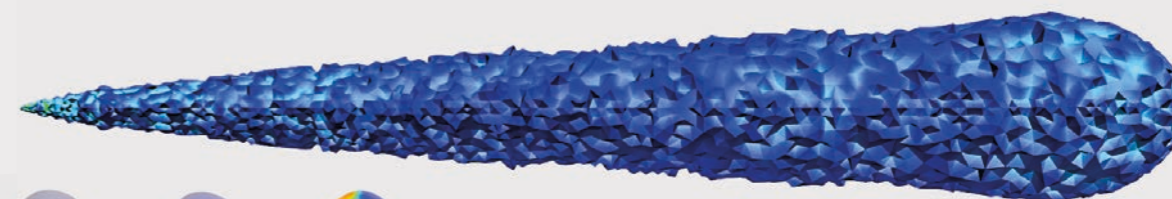
Численное моделирование применяется как для прогноза результатов предстоящих экспериментов, так и для расчетно-теоретического обоснования безопасности уже существующих, планируемых и строящихся объектов технологических цепочек водородной энергетики.



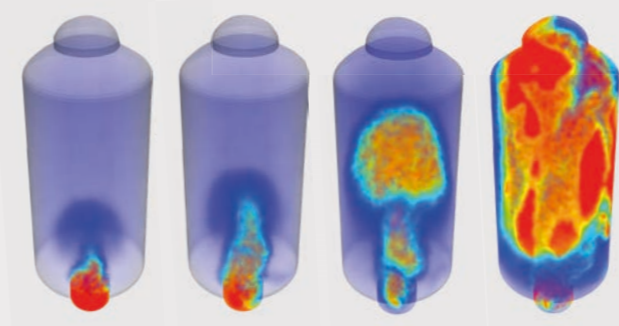
моделирование гильотинных разрывов трубопроводов с горючими газами при риформинге природного газа



распространение горения в стратифицированной водородосодержащей смеси



формирование струи водорода при разгерметизации ёмкости высокого давления



горение водородосодержащей смеси в замкнутом объеме

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ

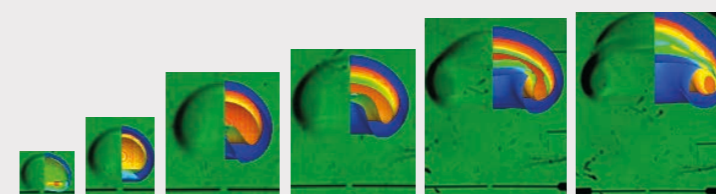
Результаты, получаемые на установках и стендах, с высокой точностью воспроизводятся численным кодом в широком диапазоне концентраций водорода в воздухе, что является уникальным результатом в мире! С помощью этого кода планируется исследовать механизмы ускорения пламен, выработать более точные критерии вместо существующих эмпирических подходов.

Продолжается верификация программных средств, способных рассчитывать скорости фронтов горения, перепады давления, параметры излучения, а также процессы переноса газовых компонентов. Эти средства позволят с высокой точностью спрогнозировать протекание крупномасштабных аварий. Однако, в

настоящее время временные затраты одного расчета позволяют применять их для анализа только некоторых выбранных вариантов из числа всевозможных аварийных сценариев.

Для решения этой проблемы создается программа для экспресс-оценки взрывобезопасности и анализа наносимого ущерба от аварийных ситуаций. Разрабатываются упрощенные инженерные модели опасных процессов. С помощью этой программы в интересах проектных организаций будет оценена количественная мера риска конкретных технологических решений, будут построены зоны поражений и безопасных расстояний для персонала.

Шаровое пламя

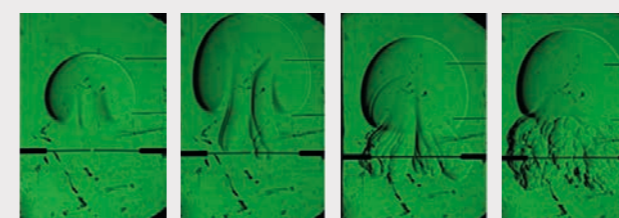


■ расчетный результат
■ фактический результат

Переходный режим

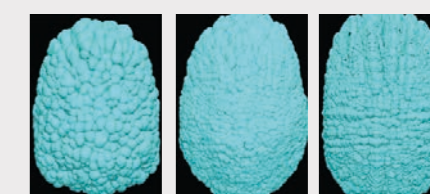


■ расчетный результат

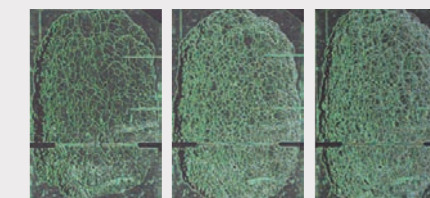


■ фактический результат

Ячеистое пламя

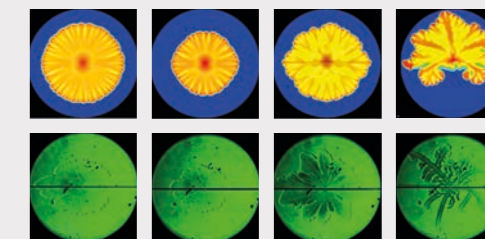


■ расчетный результат



■ фактический результат

Горение в зазорах



■ расчетный результат
■ фактический результат

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемые технологии водородной энергетики слабо исследованы на предмет безопасности, поэтому необходимы инструменты анализа пожаровзрывобезопасности на основе достоверных данных, которые можно получить с помощью развитой экспериментальной и расчетной базы. Такими возможностями обладает РФЯЦ – ВНИИТФ.

РФЯЦ-ВНИИТФ предлагает партнерам совместные работы в области исследований, расчетов и выработки рекомендаций по обеспечению безопасности при производстве, хранении, перевозке и потреблении водорода.

Совместные работы в области экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, выработке рекомендаций, а также использование программных продуктов, позволят оценить зоны поражений и безопасных расстояний, количественно оценить меру риска конкретных технологических решений объектов водородной инфраструктуры Заказчика.

Результат совместных работ позволит существенно снизить риск возникновения аварийных ситуаций на объектах водородной энергетики, что, в свою очередь, обеспечит привлекательность российских технологий водородной энергетики на международном рынке и устойчивый экономический рост.



При выполнении работ РФЯЦ – ВНИИТФ сотрудничает с передовыми научными центрами страны (Курчатовский институт, ОИВТ РАН, ИБРАЭ РАН, МГУ, НТЦ ЯРБ, «Кинтех лаб» и др., в рамках контура ГК «Росатом» – ОКБМ Африкантов, ВНИИАЭС, НПО Центротех, Луч и др.). Особая благодарность АО «Концерн Росэнергоатом» за поддержку работ».

456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, д. 13, а/я 245
ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»

Иванов Анатолий Семенович

+7 (351-46) 5-25-16

+7 922 233 3018

Безгодов Евгений Витальевич

+7 (351-46) 5-41-57

