

РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИЗДАНИЙ

Nuclear Engineering and Design
342 (2019) 133–146

**РОЛЬ CFD МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ
ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ – VII: ОЦЕНКА ДЕФЛАГРАЦИИ ВОДОРОДА
В КРУПНОМАСШТАБНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
СО СМЕСЯМИ ВОДОРОД/ВОЗДУХ/ВОДЯНОЙ ПАР**

Тадей Холлер (Словения), Эд М.Дж. Комен (Нидерланды), Иво Кленак (Словения)

Предполагаемая серьезная авария на атомной электростанции (АЭС) может привести к образованию большого количества водорода в защитной оболочке АЭС. Потенциальное горение водорода и последующие динамические нагрузки под давлением могут нанести ущерб целостности защитной оболочки и ее конструкции, системам и компонентам. В данной статье представлены результаты проверки метода CFD-моделирования, основанного на двух моделях горения, а именно модели распространения турбулентного фронта пламени (TFC) и расширенной модели TFC (ETFC). Последняя была дополнительно доработана с целью изучения влияния скорости ламинарного пламени на моделирование изменения и распространения пламени. В результате был внедрен и апробирован недавно разработанный подход в форме дополненной модели ETFC. Для проверки были использованы результаты незначительной дефлаграции водорода в результате эксперимента по восходящему распространению пламени (UFPE), проведенного на крупномасштабной экспериментальной установке НУКА-А2. Были представлены и рассмотрены основные результаты проведенной валидации с акцентом на такие параметры, как распространение осевого и радиального фронта пламени, максимальное давление, скорость повышения давления и развитие фронта пламени.

Ключевые слова: *водород, горение, дефлаграция, пламя предварительно перемешанной смеси*



Nuclear Engineering and Design

343 (2019) 103–137

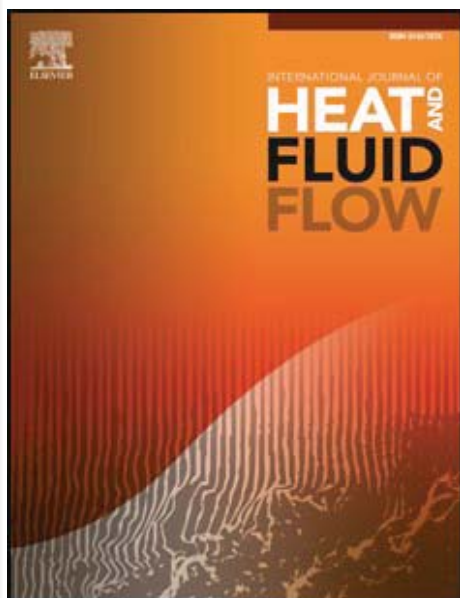
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЛАГРАЦИИ ВОДОРОДА В МНОГОКАМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

С. Гупта, Г. Лангер (Германия)

В ходе серьезной аварии поддержание целостности защитной оболочки имеет фундаментальное значение для предотвращения попадания продуктов деления в окружающую среду, что становится очевидным при сравнении серьезных аварий на АЭС на Три-Майл-Айленде, в Чернобыле и на Фукусиме. Поскольку целостность защитной оболочки в основном нарушается в результате горения водорода на ранней и промежуточной фазах серьезной аварии, связанной с разрушением активной зоны реактора, исследования поведения водорода были и остаются в центре внимания международных исследований.

В данной статье представлен обзор экспериментов по горению водорода с предварительно смешанной и стратифицированной (многослойной) атмосферой в помещениях с несколькими отсеками, как при вентилируемом горении, так и при горении в закрытых помещениях. Обсуждается влияние масштаба, а также были определены пороговые значения габаритов помещения, при превышении которых не следует ожидать дальнейшего увеличения пикового давления и пиковой температуры. Оцениваются эффекты, типичные для дефлаграции в нескольких отсеках, такие как воспламенение струи, смещение несгоревшей смеси и взаимодействие фронтов пламени. Обсуждается влияние некоторых инженерных мер безопасности, таких как системы распыления и вентиляционно-фильтрующей системы защитной оболочки ядерного реактора на горение водорода. В ходе обсуждения соответствующей экспериментальной работы рассматриваются такие явления, связанные с горением водорода, как ресуспензия продуктов деления и разложение продуктов деления, которые могут возникать во время дефлаграции или в постоянном пламени.

На основе обзора состояния проблемы выявлены пробелы в знаниях и открытые вопросы о горении водорода, которые требуют дальнейшей исследовательской работы с использованием достаточно крупных экспериментальных установок с целью упрощения применения результатов к корпусам реакторов.



International Journal of Heat and Fluid Flow 76 (2019) 154–169

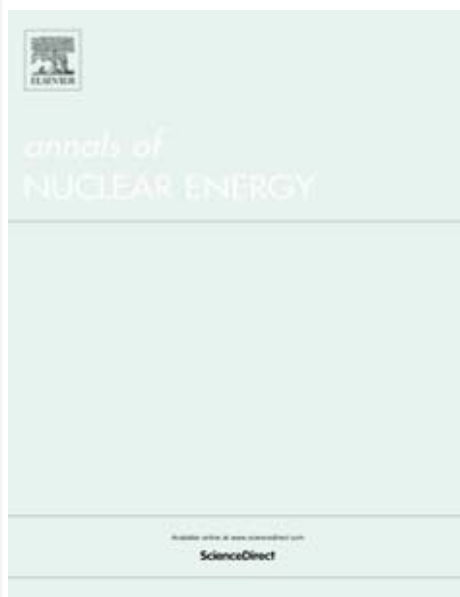
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НЕПОДВИЖНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Р. Мевель (Китай), Ж. Мельгизо-Гавиланес (США, Франция), Л.Р. Бек (США), Дж. Э. Шепард (США)

С помощью двухцветной пирометрии и интерферометрии было экспериментально исследовано воспламенение водородно-воздушных смесей стационарной горячей запальной свечой. Процесс воспламенения характеризовался температурой поверхности при воспламенении, а также местом, где образовалось начальное ядро пламени. Результаты эксперимента показывают, что: 1) порог температуры воспламенения зависит от коэффициента эквивалентности; 2) место воспламенения зависит от скорости нагрева запальной свечи, поскольку высокая скорость нагрева способствует неравномерному нагреву. В результате воспламенение происходит сбоку, а не вблизи верхней части запальной свечи.

Сравнение с двумерным численным моделированием показывает расхождения с точки зрения порогового значения температуры и зависимости от коэффициента эквивалентности. Моделирование, проведенное с учетом неравномерной температуры поверхности, показывает, что разница температур между боковой и верхней частями запальной свечи от 12,5 до 25 К приводит к боковому воспламенению водородно-воздушных смесей. Влияние химического состава поверхности оценивалось численно путем наложения граничного условия нулевой концентрации частиц для промежуточных частиц, H и HO_2 , на горячей поверхности, что увеличивало порог воспламенения до 50 К при начальной концентрации H_2 70 %. Настоящее исследование показывает, что неравномерность температуры поверхности, гетерогенный химический состав и используемая модель реакции могут влиять на экспериментально сообщенный и численно предсказанный порог воспламенения, а также на местоположение воспламенения.

Ключевые слова: *воспламенение горячей поверхности, промышленная безопасность, водород, численное моделирование*



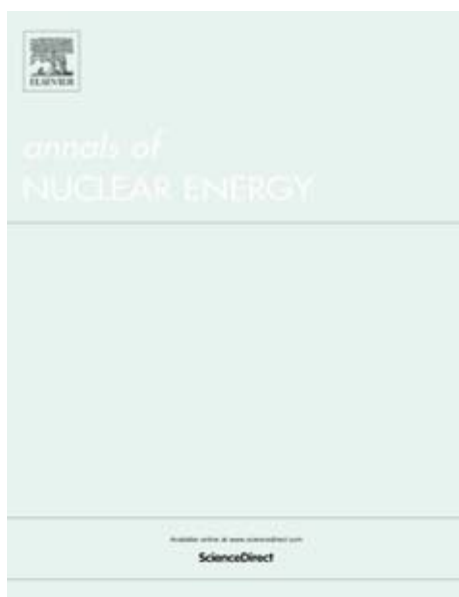
Annals of Nuclear Energy 129 (2019) 249–252

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕСТ ПОДАЧИ ИНЕРТНОГО ГАЗА НА ПРОДУВКУ КОНТЕЙНМЕНТА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ НА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Сюэфэн Лю, Сяньюань Мэн, Боксуэ Ван, Фенглей Ниу, Шуай Лю, Сюн Хуан, Хуацян Инь (Китай)

Во время серьезных аварий на атомной электростанции AP1000 образуется и выбрасывается в защитную оболочку большое количество водорода. Очень важно изучить меры по снижению риска попадания водорода в защитную оболочку. Код анализа серьезных аварий используется для изучения параметров источника выброса водорода и образования водяного пара во время предполагаемой тяжелой аварии, вызванной кодом LB-LOCA, с отказом гравитационного впрыска в усовершенствованной пассивной защитной оболочке PWR. Затем, предполагая, что оба комплекта воспламенителя водорода отключены, а пассивные рекомбинаторы водорода функционируют нормально, авторы используют трехмерный CFD код GASFLOW для изучения влияния точки впрыска инертного газа на снижение риска выброса водорода во время продувки контейнента инертным газом. Расчеты показывают, что газообразный CO₂ подходит для использования в качестве инертного газа. В процессе продувки контейнента точка впрыска инертного газа должна находиться ниже источника водорода. Инертный газ усиливает диффузию и перемешивание водорода и снижает локальный риск выброса водорода в защитной оболочке.

Ключевые слова: *риск выброса водорода, параметры источника выброса водорода, точка впрыска, продувка контейнента инертным газом*



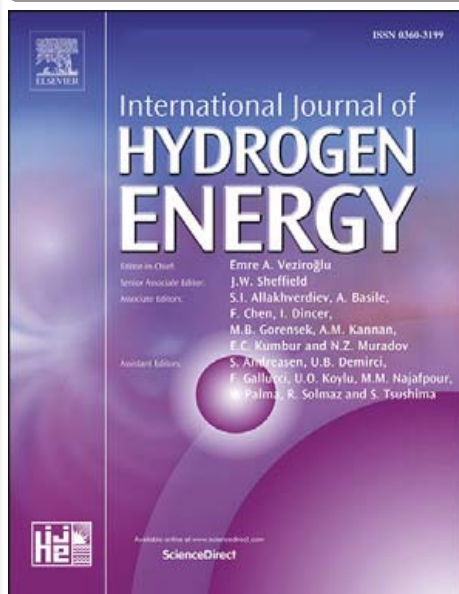
Annals of Nuclear Energy 129 (2019) 253–263

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ВОДОРОДА НА АТОМНОЙ СТАНЦИИ CPR1000 ВО ВРЕМЯ ОПЕРАЦИИ ПО ПЕРЕГРУЗКЕ ТОПЛИВА

Чжиао Хуан, Хуэйфан Мяо, Чэньси Чжэн, Нин Ли, Синвэй Ши, Лей Лей (Китай)

Данное исследование посвящено выявлению риска выбросов водорода и оптимизации существующих систем снижения выбросов водорода на атомной электростанции (АЭС) CPR1000 во время операции по перегрузке топлива. Был разработан подробный ввод кода MELCOR (код для анализа тяжелых аварий с расплавлением активной зоны ядерного реактора), который включает в себя детальную изоляцию нодализации, точную конфигурацию систем пассивного автокаталитического рекомбинатора (PAR), а также реалистичные граничные условия, основанные на конструктивных параметрах и технических характеристиках. Выбираются два случая, которые представляют различные состояния работы станции (POS) и конкретные пути выделения водорода, и впоследствии анализируется развитие аварии и риск выбросов водорода. Анализ показывает, что риска выбросов водорода, по-прежнему имеет большое значение во время операции по перегрузке топлива, хотя развитие аварии происходит медленнее. Системы PAR с текущей конфигурацией были добавлены в модель станции для проверки эффективности системы защиты от выбросов водорода на CPR1000 во время операции по перегрузке топлива. Результаты показывают, что текущая конфигурация систем PAR по-прежнему эффективна для снижения риска выброса водорода во время аварии в POS E, но недостаточна для снижения риска выброса водорода во время аварии в POS H. Поэтому предлагаются две стратегии улучшения систем снижения выбросов водорода, и сравнивается их эффективность. Сделан вывод о том, что в зоне заправочного бассейна следует использовать мобильные воспламенители во избежание серьезного риска выбросов водорода во время операции по перегрузке топлива. Результаты данного исследования могут помочь в разработке модели вероятностной оценки безопасности (PSA) низкой мощности и прекращения работы реактора (LPSD), а также повысить пропускную способность АЭС для снижения риска выбросов водорода во время операции по перегрузке топлива.

Ключевые слова: *риск выбросов водорода, система PAR, операция по перегрузке топлива, CPR1000, код MELCOR*



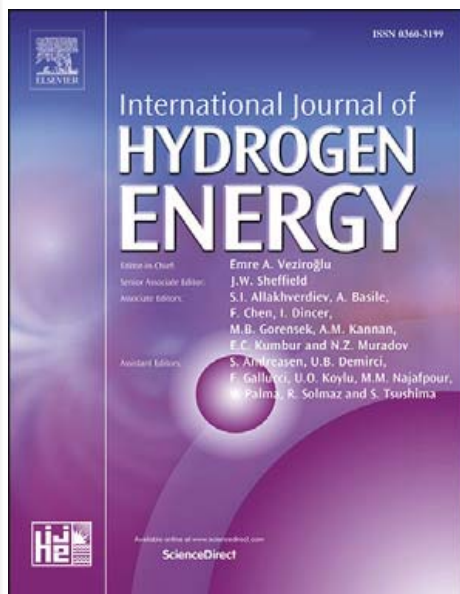
International Journal of Hydrogen Energy 44 (2019) 8780–8790

ДВУХЗОННАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПРЕДНАЗНАЧЕННАЯ ДЛЯ ПРОЦЕССА ЗАПРАВКИ ВОДОРОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Цзиньшэн Сяо (Китай, Канада), Сюй Ван (Китай), Синь Чжоу (Китай), Пьер Бенар (Канада), Ричард Чахайн (Канада)

Благодаря простой конструкции и быстрому процессу заправки в настоящее время широко используется система хранения сжатого водорода. Однако тепловые воздействия во время цикла заправки – опорожнения могут вызвать изменение температуры в резервуаре для хранения, что оказывает значительное влияние на производительность хранилища водорода и безопасность резервуара для хранения водорода. Чтобы решить эту проблему, авторами была предложена однозонная модель концентрированных параметров для получения аналитического решения значения температуры водорода и использовано аналитическое решение для оценки температуры водорода, однако влияние стенки резервуара игнорируется. Для лучшего описания характеристик теплопередачи стенки резервуара будет рассмотрена двухзонная модель концентрированных параметров (газообразный водород и стенка резервуара) для широкого представления справочных (экспериментальных или моделируемых) данных. Затем авторы расширили однозонную модель до двухзонной, в которой используются две разные температуры для газовой зоны и пристенной зоны. Двухзонная модель содержит два связанных дифференциальных уравнения. Чтобы решить их, авторы используют метод разъединения связанных дифференциальных уравнений и связывания решений несвязанных дифференциальных уравнений. Этапы метода включают: (1) разъединение связанных дифференциальных уравнений; (2) решение несвязанных дифференциальных уравнений; (3) объединение решений дифференциальных уравнений; (4) решение связанных алгебраических уравнений. В этих уравнениях принимаются во внимание три случая: постоянная температура притока/оттока, переменная температура притока/оттока и постоянная температура притока и переменная температура оттока. Могут быть получены соответствующие приближенные аналитические решения температуры водорода и температуры стенки. Давление водорода можно рассчитать по температуре водорода и массе водорода, используя уравнение состояния идеального газа. Кроме того, два связанных дифференциальных уравнения могут быть решены численно, а также может быть получено смоделированное решение. Данное исследование поможет разработать подход, основанный на формулах, к протоколу дозаправки транспортных средств на газообразном водороде.

Ключевые слова: хранение водорода, дозаправка, быстрое заполнение, термодинамика, теплопередача, безопасность



International Journal of Hydrogen Energy 44 (2019) 8791–8798

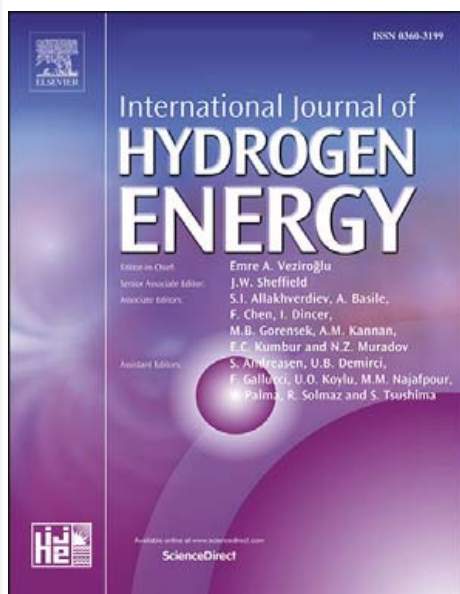
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РИСКОВ ДЛЯ ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ И ФИНАНСОВЫЙ УЩЕРБ ВСЛЕДСТВИЕ ДОРОЖНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ С УЧАСТИЕМ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ке Сун, Чжиен Ли (Китай)

Использование водорода в транспортных средствах является первой попыткой крупномасштабного применения водородной энергии среди потребителей, что вызвало опасения по поводу его безопасности как в государственных органах, так и в частных организациях, таких как пожарные службы и страховые компании. В данной статье проводится анализ типичного сценария развития аварий с участием транспортных средств с водородными топливными элементами в результате дорожно-транспортного происшествия. Основные последствия, связанные с водородом, в том числе возгорание сталкивающихся струй и катастрофические разрывы резервуаров, оцениваются отдельно с точки зрения продолжительности аварии и опасных расстояний. Результаты показывают, что при автомобильной аварии с участием топливных элементов мощностью 70 МПа основную опасность представляет выброс водорода при опорожнении бака, это может произойти в течение первых 1,5 минут.

В целях безопасности окружающих рекомендуется оградить место происшествия в радиусе 100 м, если не слышно шипящих звуков. Однако периметр может быть уменьшен до 10 м, как только прекратится шипящий звук выделения водорода. Кроме того, в статье количественно оцениваются риски смертельных исходов, травм и ущерба в финансовом выражении для оценки последствий аварии. Результаты показывают, что финансовые потери от несчастных случаев со смертельным исходом и травмы составляют большую часть общего финансового ущерба, указывая на то, что страховая премия за несчастные случаи со смертельным исходом и травмы должна быть установлена выше, чем страховая премия за потерю имущества.

Ключевые слова: *транспортное средство на водородных топливных элементах, анализ рисков, оценка последствий, опасное расстояние, финансовые потери*



International Journal of Hydrogen Energy 44 (2019) 22654–22660

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ ВОДОРОД/ВОЗДУХ/ИНГИБИТОР В ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ

Чао Чжан (Китай), Дженнифер Вэнь (Великобритания) Сяобо Шен (Китай), Гуанли Сю (Китай)

Было проведено экспериментальное исследование распространения пламени предварительно перемешанной смеси водород/воздух в закрытом прямоугольном канале с добавлением ингибиторов (N_2 или CO_2) для изучения ингибирующего влияния N_2 и CO_2 на свойства пламени во время его распространения. Для регистрации эволюции формы пламени и изменений давления в канале были использованы как система Шлирена, так и датчик давления. Было обнаружено, что и N_2 и CO_2 оказывают значительное ингибирующее действие на предварительно перемешанную смесь водород/воздух. По сравнению с N_2 , CO_2 обладает более выраженным ингибированием, которое было интерпретировано с термической и кинетической точек зрения. Во всех языках пламени наблюдалась классическая форма тюльпана. При различной концентрации ингибитора пламя продемонстрировало три типа формоизменения после классической инверсии формы тюльпана. Также был проведен простой теоретический анализ, чтобы показать, что волна давления, возникающая при первом контакте пламени со стеной, может влиять на деформацию пламени в зависимости от момента ее контакта с фронтом пламени. Самое главное, что момент встречи всегда наступает после начала инверсии формы тюльпана, что говорит о не доминирующей роли волны давления в этом характерном явлении.

Ключевые слова: *водород, ингибирование, пламя предварительно перемешанной смеси, волна давления, динамика*

**Материал (поступил в редакцию 01.02.2022 г.)
подготовили:**

Ю.В. МЕЛЬНИКОВА, науч. сотр.;
Н.В. САЙГИНА, ст. науч. сотр.;
О.Г. КАСПИНА, нач. сектора;
А.И. МИРОНОВА, науч. сотр.
(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)