

«XIII ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

Снежинск, 20–24 марта 2017 г.



РЕЖИМЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОРЕНИЯ В ОБЕДНЕННЫХ СОСТАВАХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С.



Объединенный институт высоких температур
Российская академия наук
Лаборатория Математического моделирования

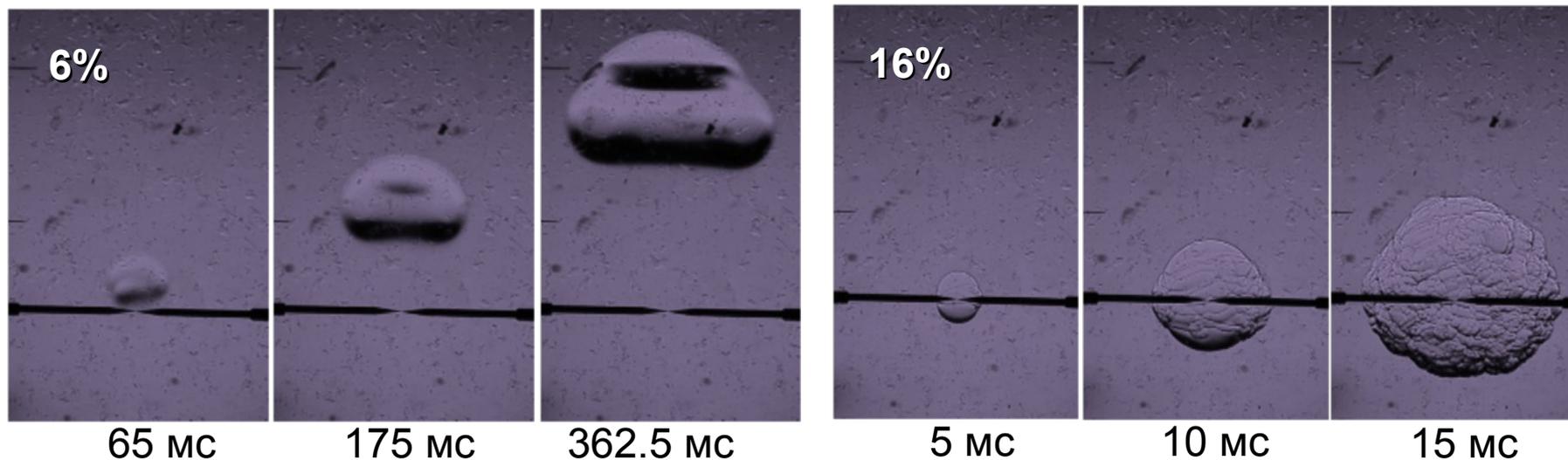
План доклада

- Экспериментальные факты;
- Два механизма распространения пламени в обедненных составах: дефлаграционные и ультрабыстрые диффузионные пламена;
- Особенности развития дефлаграционных пламен. Требования к математическим моделям;
- Особенности развития ультрабыстрых диффузионных пламен. Требования к математическим моделям;
- Заключение

Экспериментальные факты

- Концентрационный предел распространения пламени в обедненных смесях водорода с воздухом (~4-6% при нормальных условиях). Пределы распространения вверх и вниз.
- Предел распространения пламени в дефлаграционном режиме (~10% при нормальных условиях). Наблюдение смены физических механизмов распространения пламени в области ультраобедненных составов.

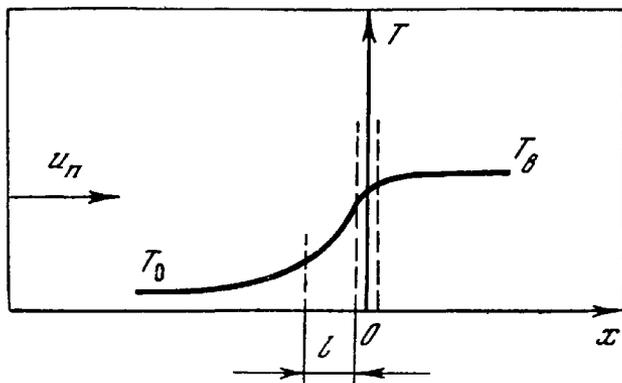
Эксперименты ВНИИТФ, 2015 г.



Дефлаграционный механизм распространения пламени

Механизм распространения пламени состоит в переносе тепловой энергии и активных радикалов из зоны горения в предпламенную зону – классическая волна дефлаграции.

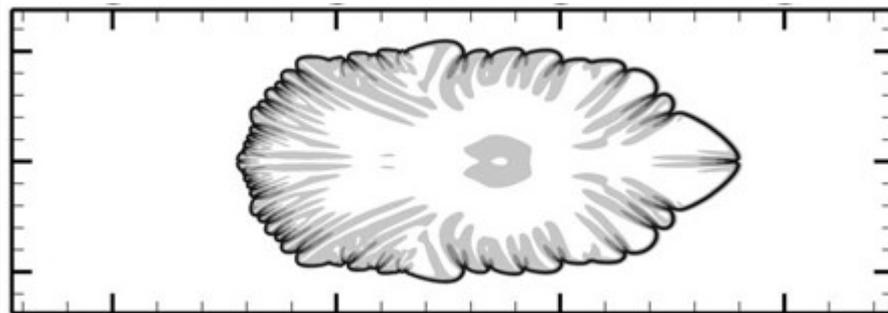
Зельдович Я.Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.



$$T = T_0 + (T_b - T_0) e^{u_n x / l}$$

Михельсоновское распределение температуры во фронте пламени
 l — ширина зоны подогрева, пунктиром показана зона реакции, $x < 0$ — несгоревший газ, $x > 0$ — продукты горения

Atomic Energy Canada Limited
12% водород-воздух



Ультрабыдное диффузионное пламя

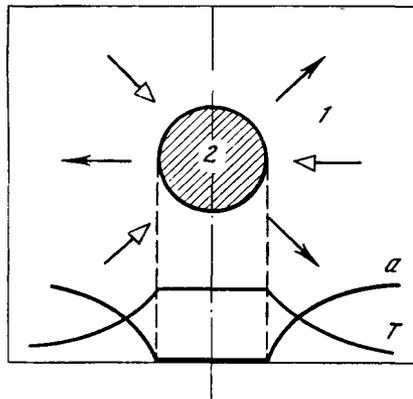
В условиях избытка окислителя легкий водород диффундирует внутрь области стационарного шарика пламени.

В условиях микрогравитации весь водород сгорает внутри локализованного очага.

$$T_1^0 = T_0 + (T_b' - T_0) r_0/r, \quad T_2^0 = T_b',$$

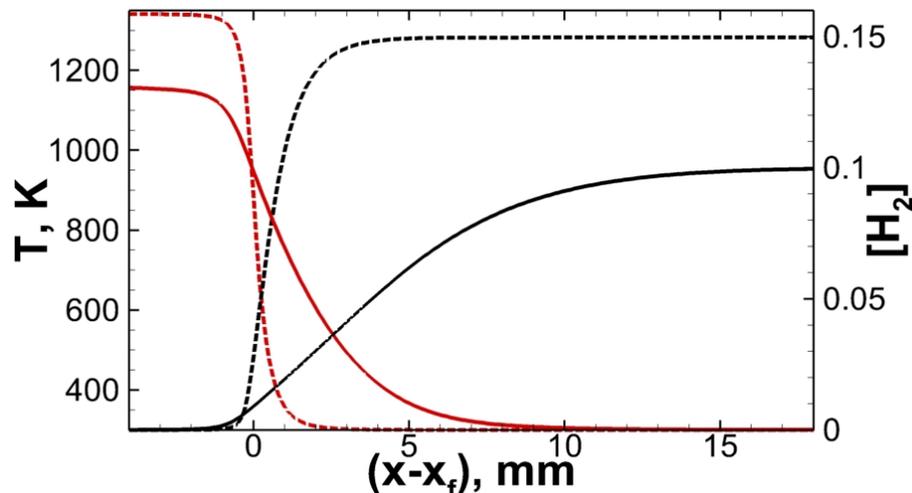
$$\alpha_1^0 = \alpha_0 (1 - (r_0/r)), \quad \alpha_2^0 = 0.$$

Зельдович Я.Б. и др.
Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.

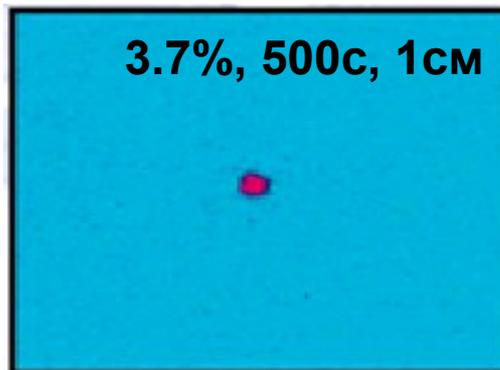


Р и с. 4.18

Неподвижный относительно горючей смеси шарик, на поверхности которого происходит сгорание по диффузионному механизму. Белые стрелки показывают подвод горючих веществ, черные стрелки — отвод тепла и продуктов сгорания. Внизу показаны распределения температуры и концентрации в радиальном направлении.

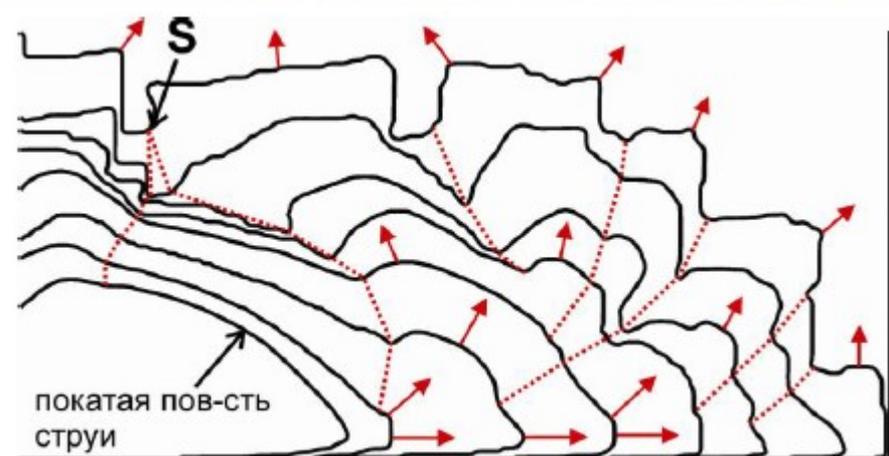
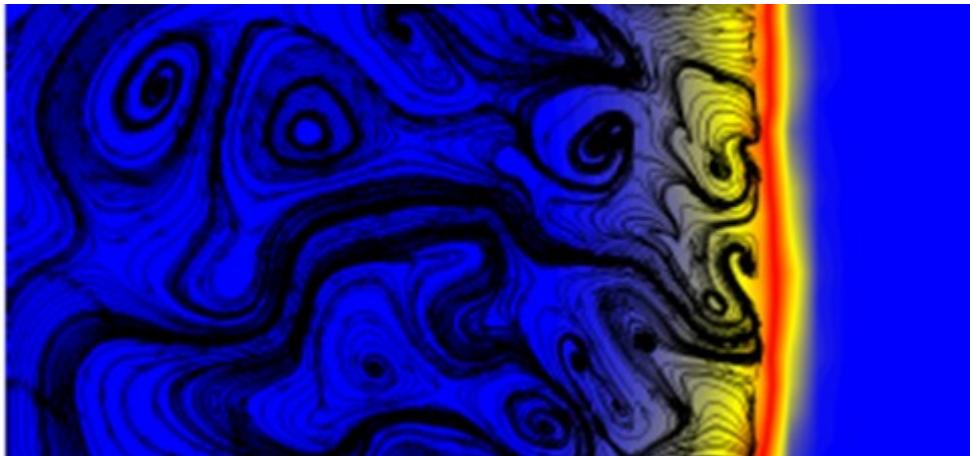
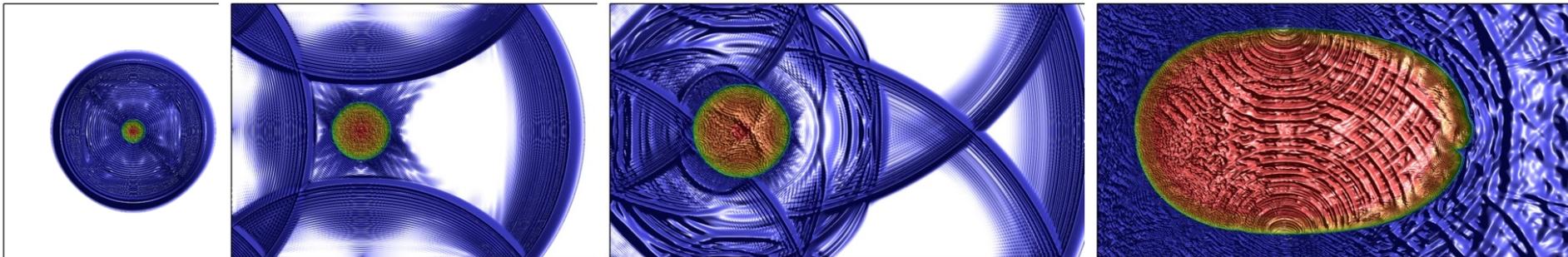


Ronney P.D. et. al. NASA Lewis Research Center, 1997



Дефлаграция в закрытом объеме, заполненном предварительно перемешанной смесью

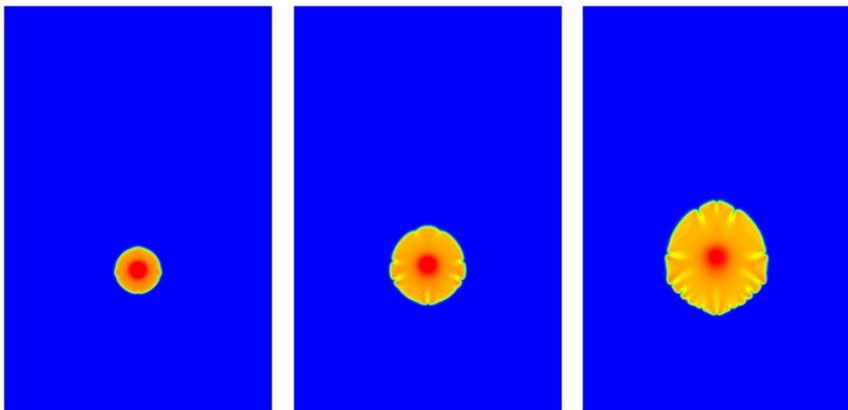
В ограниченных объемах ведущим газодинамическим механизмом, определяющим структуру пламени и скоростной режим его распространения, является взаимодействие с волновыми полями, формируемыми в результате расширения продуктов горения.



Дефлаграция в закрытом объеме: основные стадии развития процесса

- **Изотропное расширение очага из зоны воспламенения.**
- **Развитие мелкомасштабной структуры на поверхности фронта пламени на линейной стадии роста неустойчивости Ландау-Дарье.**
- **Формирование акустических полей в области свежей горючей смеси.**
- **Взаимодействие фронта пламени с акустическими полями.**

Дефлаграция в закрытом объеме, заполненном предварительно перемешанной смесью

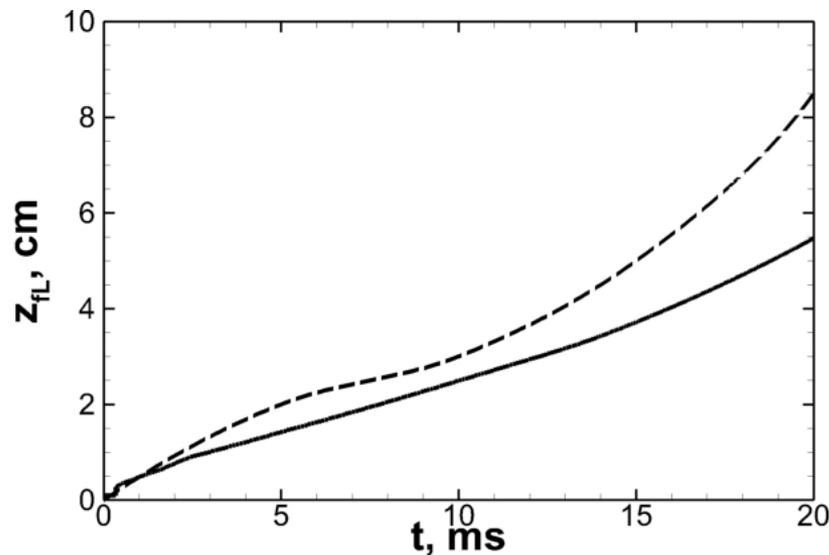


Расчеты ОИВТ РАН (16%), 2015.



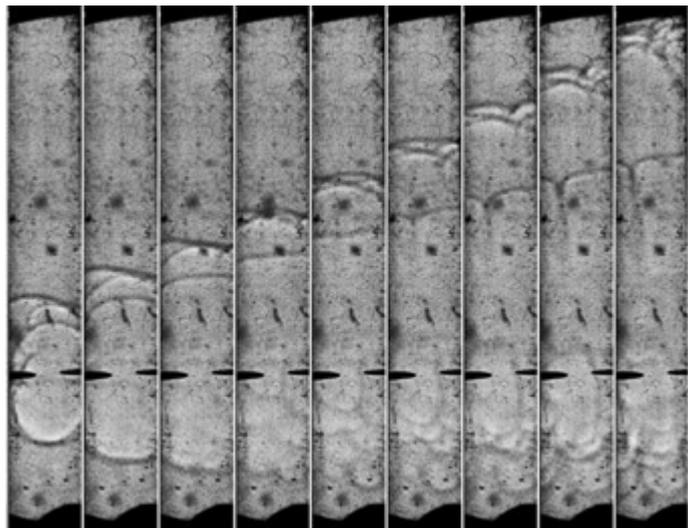
Эксперименты ВНИИТФ (16%), 2015.

Расчеты по классической модели сжимаемой вязкой теплопроводной среды с привлечением традиционных вычислительных методик (1-го, 2-ого и более высоких порядков аппроксимации) обеспечивает запаздывание в процессе развития очага горения по сравнению с экспериментом.

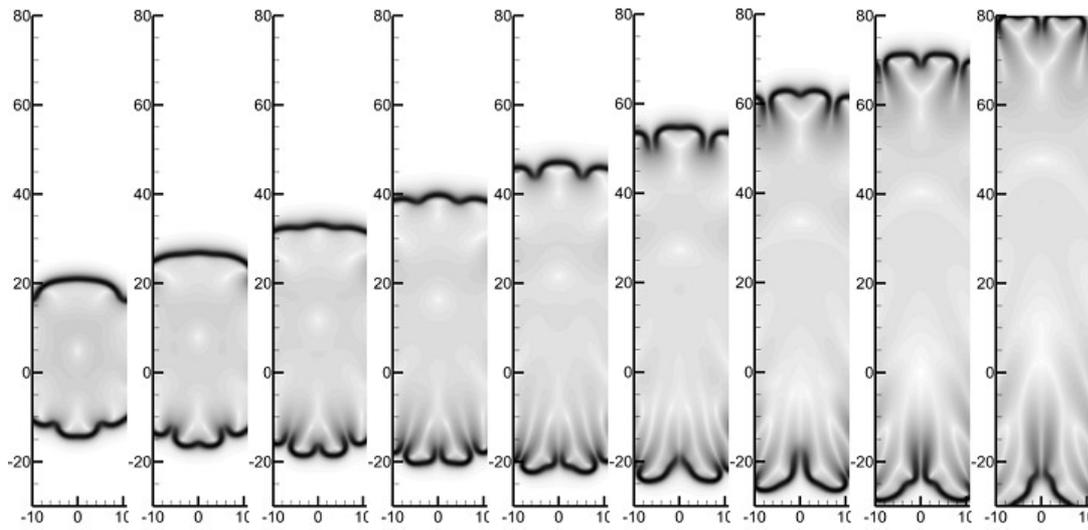


Дефлаграция в закрытом объеме, заполненном предварительно перемешанной смесью

При этом начальная фаза развития процесса до момента торможения фронта пламени вблизи ограничивающих объем стенок воспроизводится с хорошей степенью достоверности. Таким образом можно заключить, что основные отличия возникают при численном разрешении стадии, определяемой взаимодействием пламени с формирующимися в объеме акустическими полями.

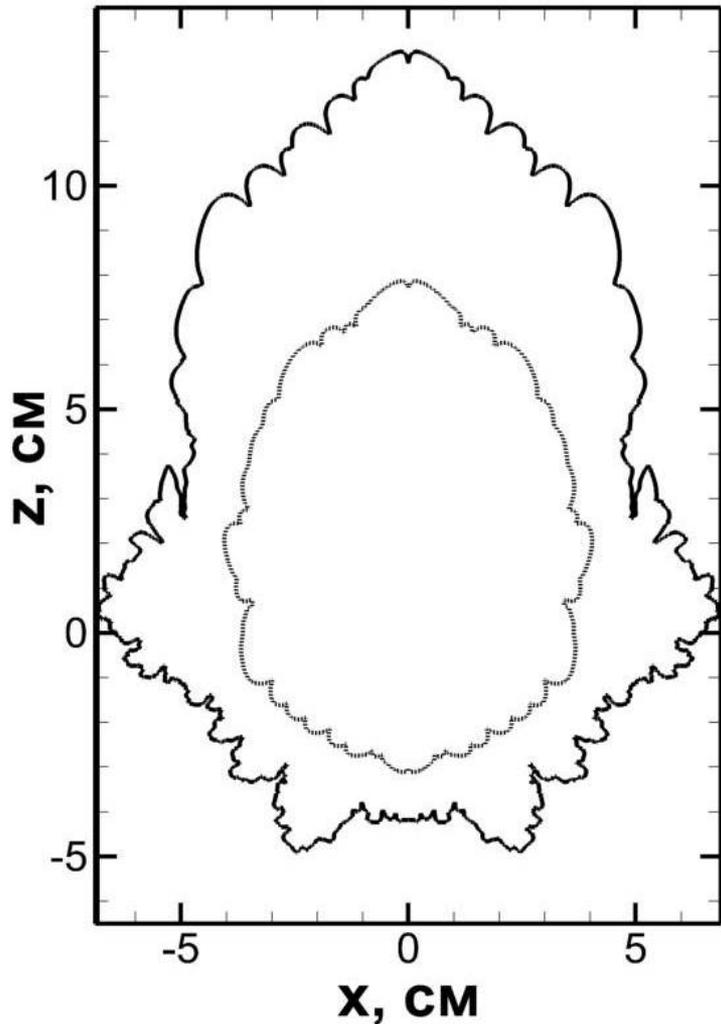


Эксперименты ИХФ РАН (12%).

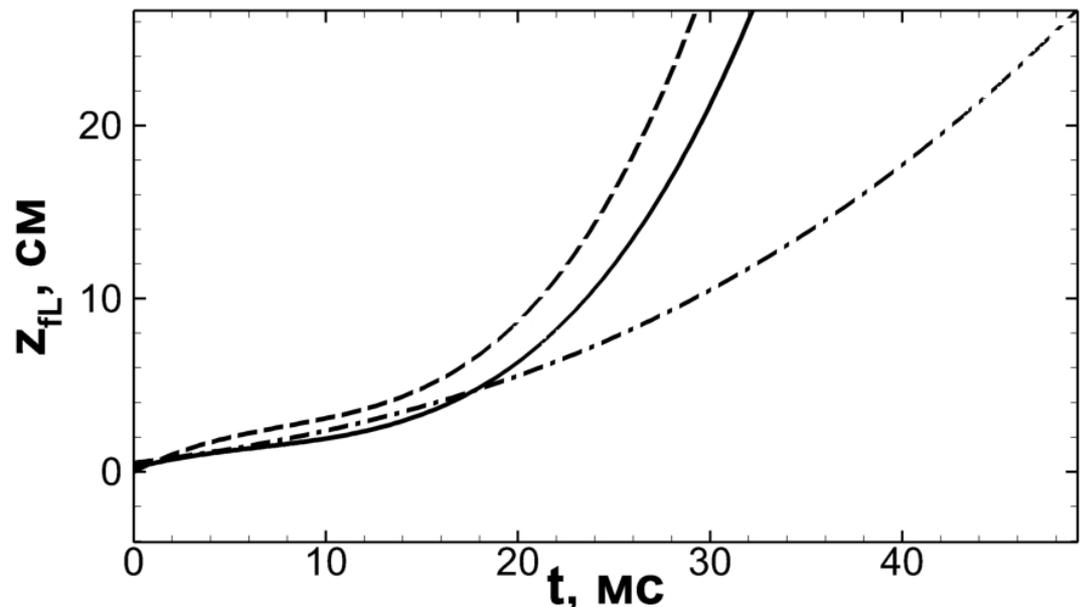


Расчеты ОИВТ РАН (12%), 2016.

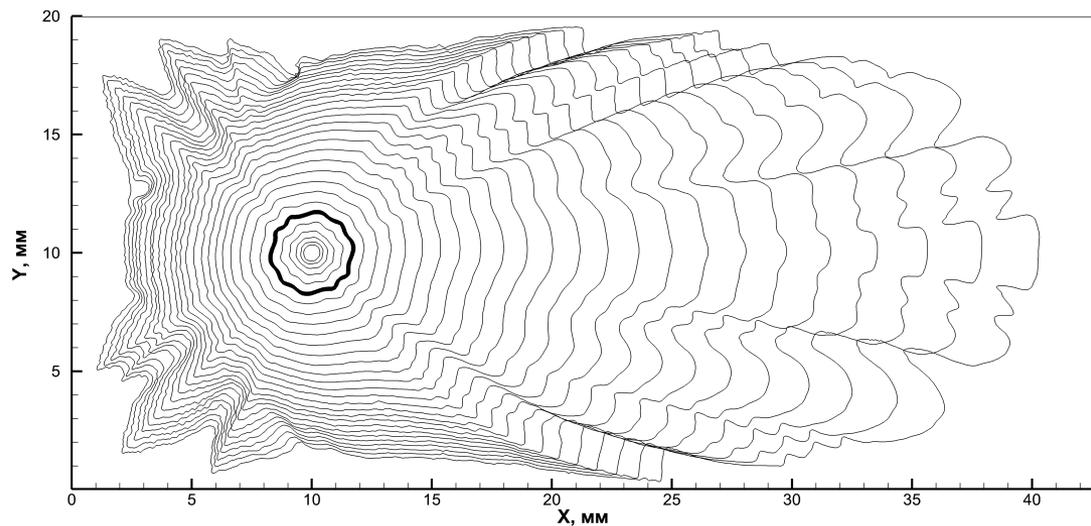
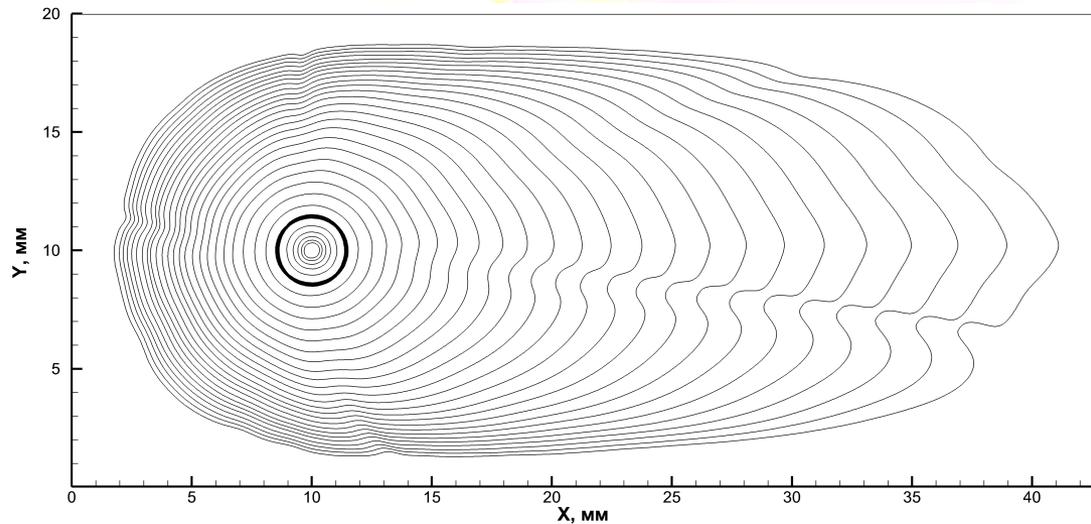
Дефлаграция в закрытом объеме. Требования к математической модели.



Расчеты с учетом поглощения импульса акустических волн в пограничном слое обеспечили искажение поля пульсаций давления, что привело к более быстрому росту мелкомасштабных структур на фронте пламени и его более быстрому распространению.



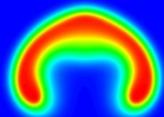
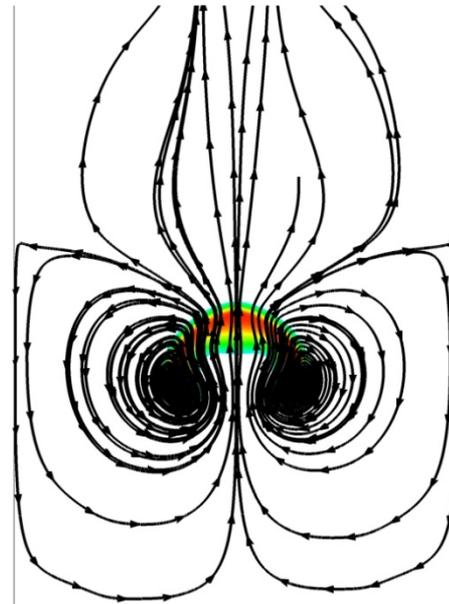
Дефлаграция в закрытом объеме. Требования к математической модели.



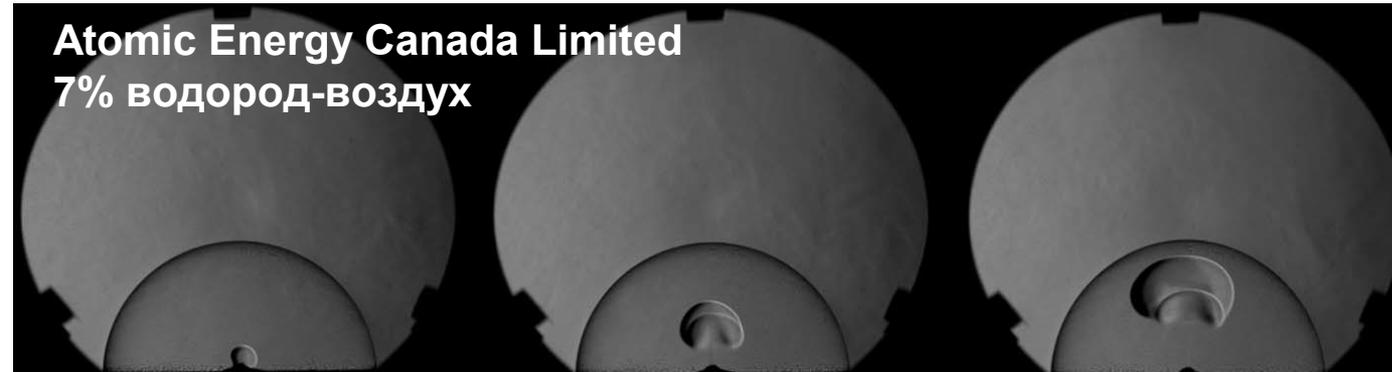
Наилучшее, по крайней мере на качественном уровне, воспроизведение особенностей эволюции пламени в акустическом поле обеспечивает использование бездиссипативных методик.

Механизмы развития ультраабедного диффузионного пламени в Земных условиях

Плавучесть горячих продуктов горения в поле гравитации обеспечивает распространение шарового пламени за счет дополнительной конвективной подачи водорода в очаг горения.

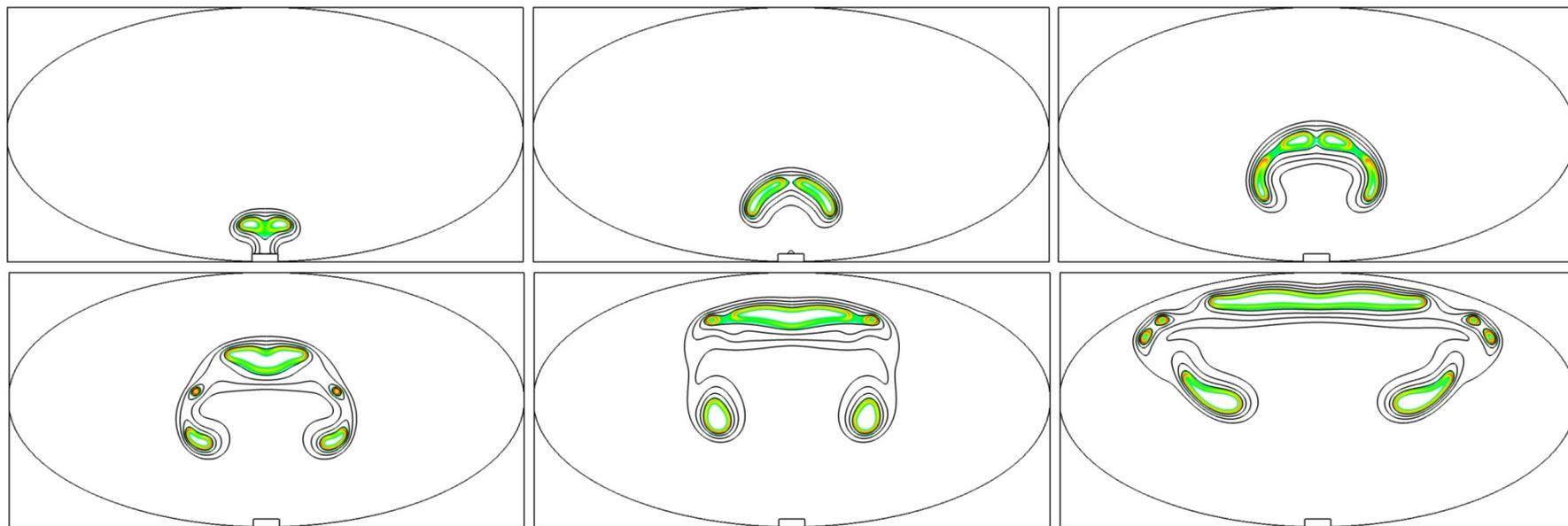


Atomic Energy Canada Limited
7% водород-воздух



Ультрабыедное горение в закрытом объеме.

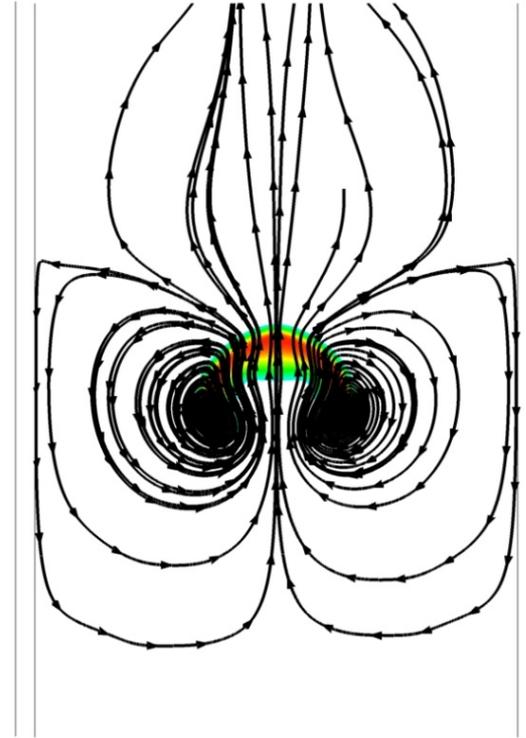
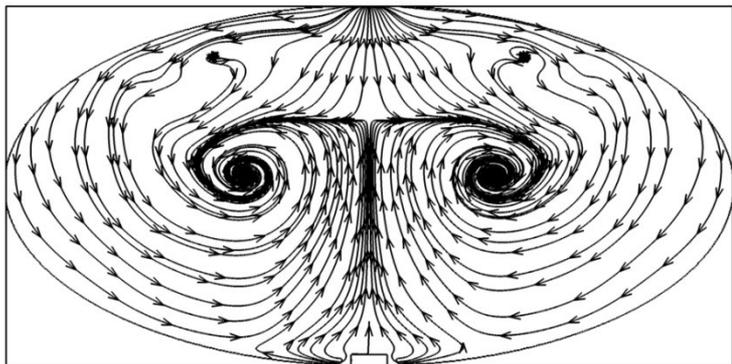
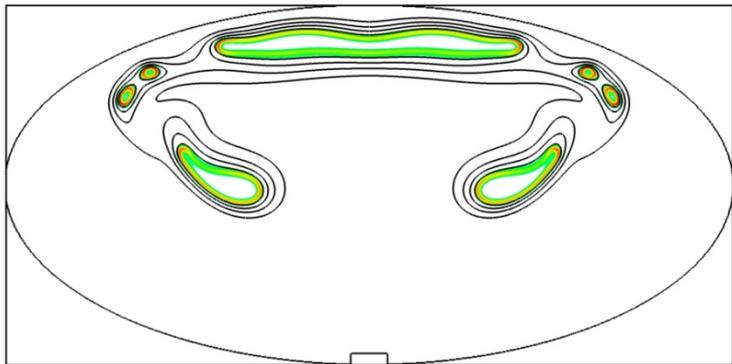
В виду малости коэффициента расширения при горении ультрабыедных составов водородно-воздушной смеси роль волн сжатия существенно снижается по сравнению со случаем дефлаграционного горения. Тем не менее потоки, формируемые в замкнутом объеме обеспечивают неравномерность поля течения и как следствие усиливают моды пульсационной неустойчивости всплывающего термика. Этот механизм оказывает двойное воздействие на развитие горения, приводя к локальному тушению, но тем временем обеспечивая развитие многоочаговых структур.



Расчеты ОИВТ РАН в постановке ВНИИТФ (6%), 2015.

Ультрабыедное горение в закрытом объеме. Требования к математической модели.

Ведущая роль конвективных течений по сравнению с малой ролью акустических процессов в развитии ультрабыедных «шариковых» пламен в закрытых объемах обосновывают упрощение математической модели и использование приближение малой сжимаемости при расчете таких режимов.



Шарики пламени в контексте водородной безопасности АЭС

- Шарики пламени – переносчики энергии из зоны энерговыделения в восходящем конвективном потоке.
- В условиях естественной стратификации водорода при заполнении им замкнутого объема шарики пламени могут стать причиной воспламенения и формирования дефлаграционных волн в верхних слоях, насыщенных водородом.
- Источником формирования шариков пламени помимо источников, свойственных развитию аварийного сценария, могут являться каталитические поверхности рекомбинаторов.
- Необходимо дальнейшее исследование устойчивости и времени жизни таких образований.

Заключение

- 1. Описаны режимы развития горения в обедненных составах водородно-воздушных смесей:**
 - Дефлаграционный, присущий обедненным составам с содержанием водорода $>10\%$;**
 - Распространение пламени в форме всплывающего термика (шарика пламени).**
- 2. Численное моделирование и сопутствующий ему анализ возможных режимов горения указывает на ряд требований, которые необходимо предъявлять к математическим моделям и программным кодам, разрабатываемым для расчетно-теоретического сопровождения специализированных экспериментов.**
- 3. Переход от одного режима горения к другому в стратифицированной атмосфере водорода с воздухом является одним из сценариев развития рисков, связанных со взрывом водорода в помещениях АЭС под защитной оболочкой.**



**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**