



Целью численного моделирования является исследование процессов, происходящих при авариях с истечением водорода из сосудов высокого давления.

Задачи расчетов: определение полей скорости, давления, плотности и температуры, а также зависимостей этих величин от времени в различных точках пространства для случаев истечения водорода из сосудов высокого давления в окружающую среду из верхнего или нижнего входов коллектора.

Постановка расчетов

На площадке хранения водорода располагаются баллоны с газом, объединенные коллекторами в несколько групп. В верхней и нижней частях каждого баллона, на оси вращения, находятся входы коллекторов.

В расчетах необходимо произвести моделирование процессов истечения через верхний и нижний входы коллекторов с учетом протекающих химических реакций и силы тяжести. При этом сплошную среду следует полагать реальным газом.

Начальные условия для расчетов

Давление в баллоне 40 МПа

Температура в баллоне 233 К

Давление окружающей среды 100 кПа

Температура окружающей среды 293 К

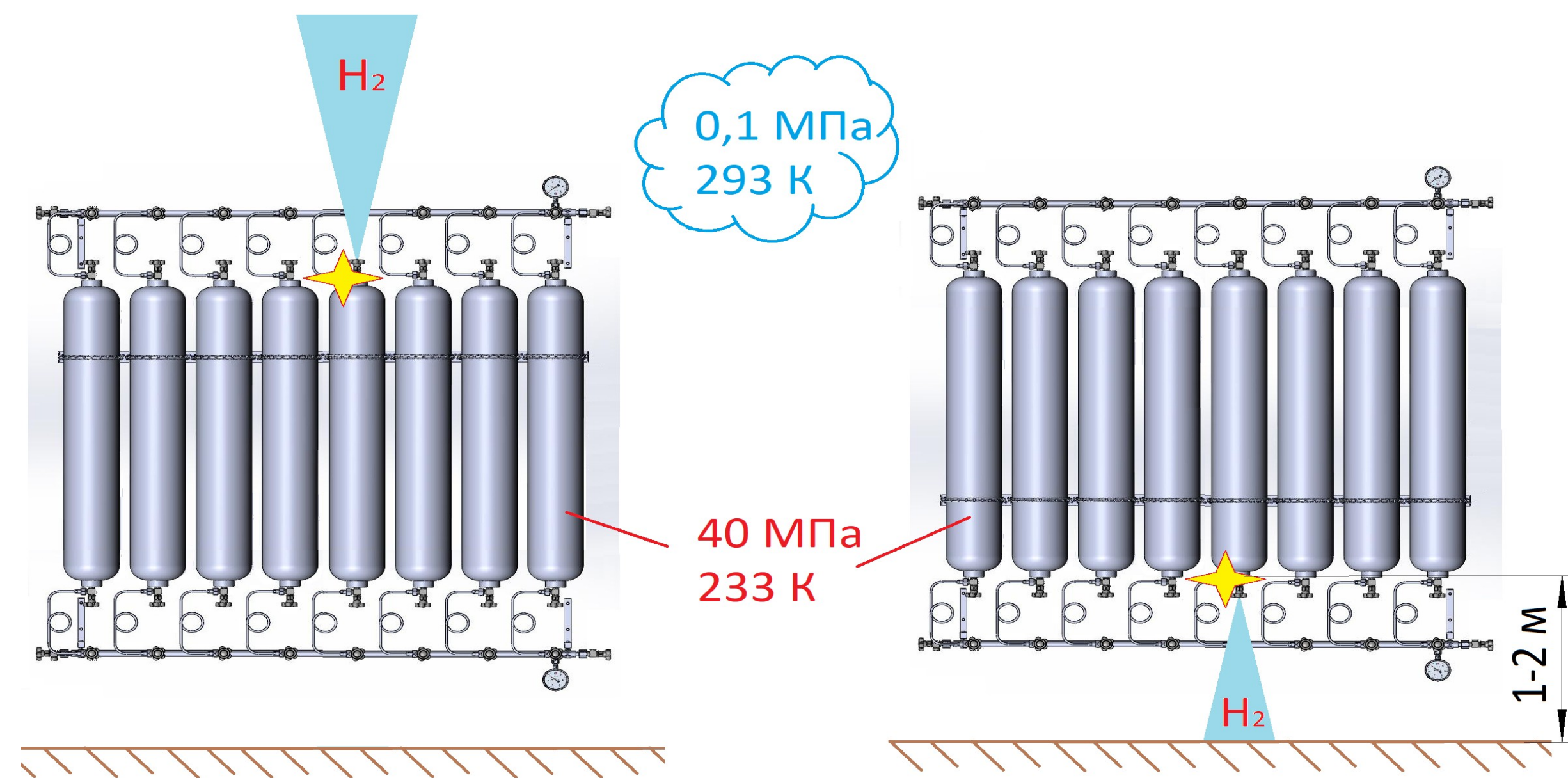
Описание расчетной модели

Расчеты производились при помощи CFD-кода OpenFOAM [1] в двумерной осесимметричной постановке на прямоугольной сетке с локальным измельчением вблизи выхода из баллона. Окружающая среда, в которую происходит истечение, представляет собой двумерную область. Моделирование истечения из нижнего входа коллектора производилось для двух значений высоты расположения баллона: 1 м и 2 м над уровнем грунта.

В результате разгерметизации одного баллона происходит опорожнение и других семи емкостей, соединенных с аварийным баллоном. Таким образом, общий объем емкости с течью в расчетной модели был увеличен в восемь раз за счет увеличения длины баллона с сохранением характерных диаметров.

Описание Физической модели

В основе моделирования теплогидравлических процессов лежат законы механики сплошной среды, а также метод конечных объемов. В расчетах моделировалось турбулентное течение (k-ε модель) многокомпонентного реального газа (УРС Ридлих-Кванг [2]) с учетом влияния силы тяжести. Моделирование химического взаимодействия водорода с атмосферным кислородом производилось на основе кинетического механизма, включающего 8 компонентов (в т.ч. промежуточные радикалы) и 19 реакций. Теплофизические свойства смеси в каждой ячейке определялись как средневзвешенные по массе. В свою очередь, свойства отдельных компонентов смеси (вязкость, теплопроводность) вычислялись с помощью молекулярно-кинетической теории; для теплоемкости – с помощью термодинамического полинома NASA [3]. Излучение и теплопередача через стенку баллона не учитывается.



Результаты Расчета №1 (истечение вверх)

1) Воспламенение водорода происходит вблизи выходного отверстия менее чем за 0,001 с!

2) Горячая струя распространяется вверх, одновременно расширяясь. В начальный момент происходит формирование сверхзвуковой недорасширенной газовой струи с характерной структурой начального участка в виде системы скачков уплотнения с резко изменяющимися газодинамическими параметрами.

3) Горение происходит на границе смешения водорода с воздухом (на фронте горения $T=2000$ К).

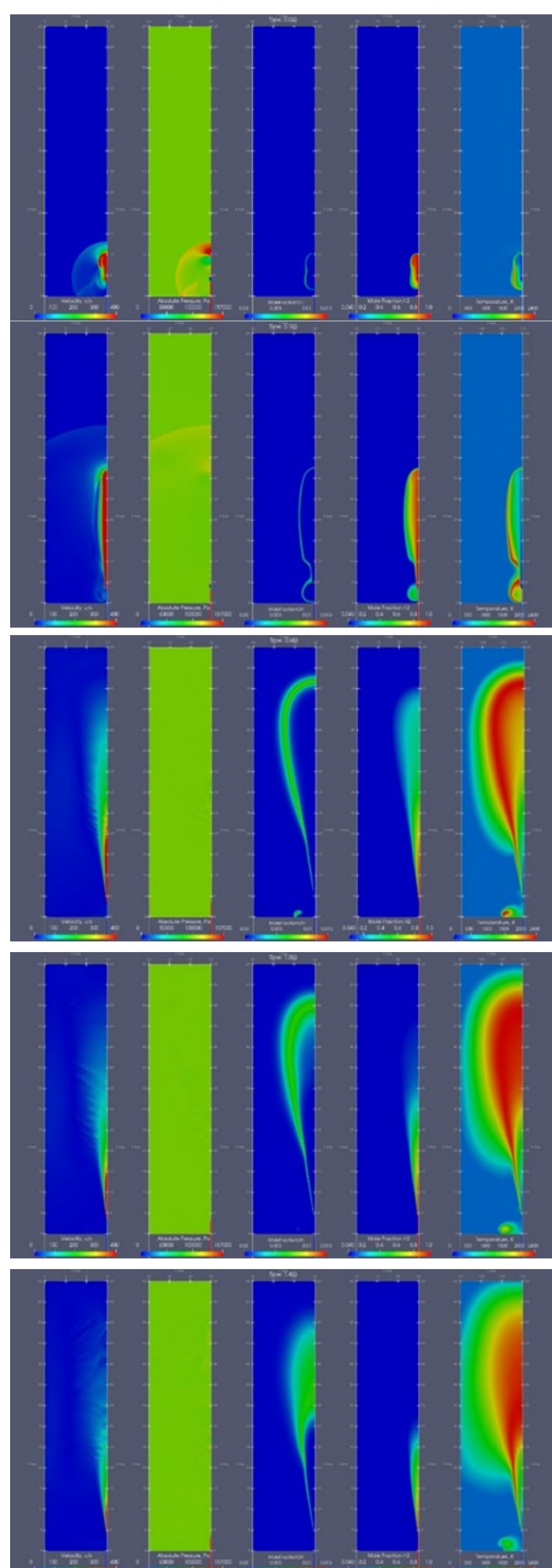
4) Температура на высоте 10 м не превышает 400 К, что связано с наличием на начальном участке области разрежения (бочки Маха), где температура опускается до нескольких десятков градусов.

5) В пике пожар-струя достигает 57 м ($t=0,68$ с) от грунта, ширина струи – 10 м.

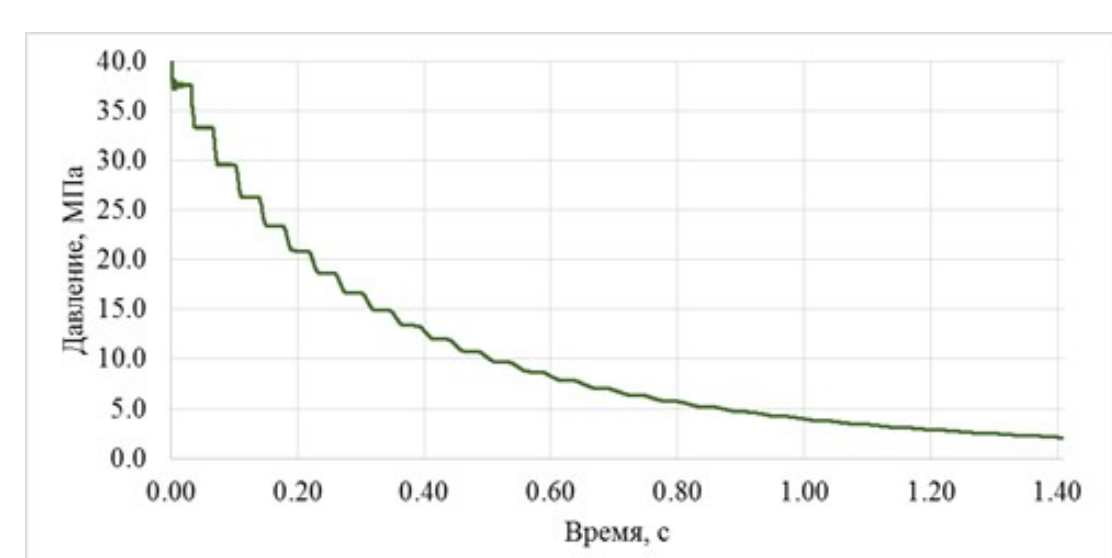
6) С падением давления в баллонах снижаются параметры струи, и фронт пламени устремляется вниз.

7) Из графика падения давления в баллонах видно, что через 3 с давление внутри опустится до атмосферного. При этом пожар-струя уменьшится и преобразуется в диффузионное пламя.

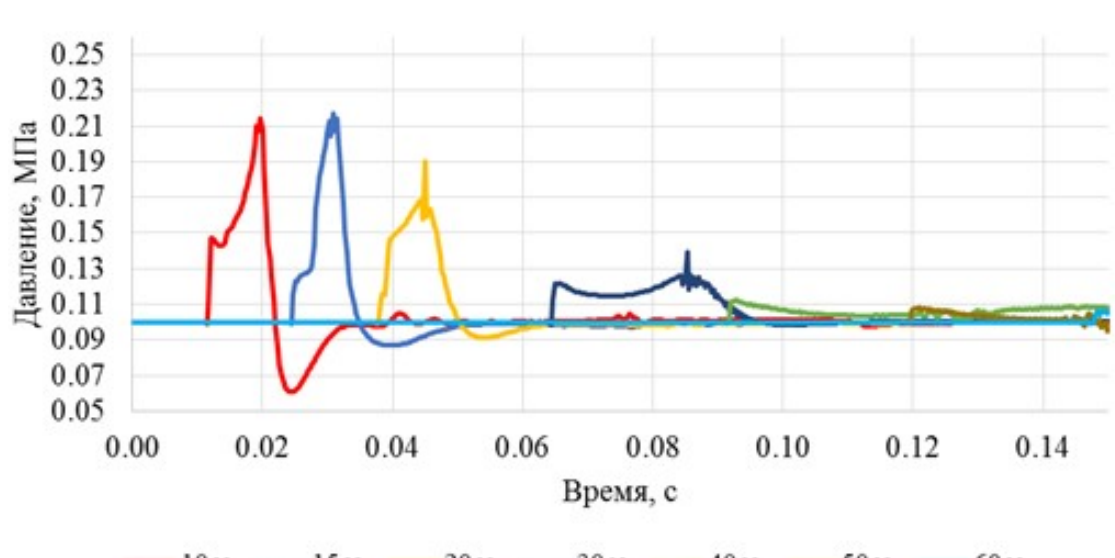
8) Скорость ударной волны, возникающей в момент разгерметизации, составляет 407 м/с. На расстоянии 5 м максимальная ее амплитуда достигает 0,21 МПа, затухание волны происходит на высоте около 60 м.



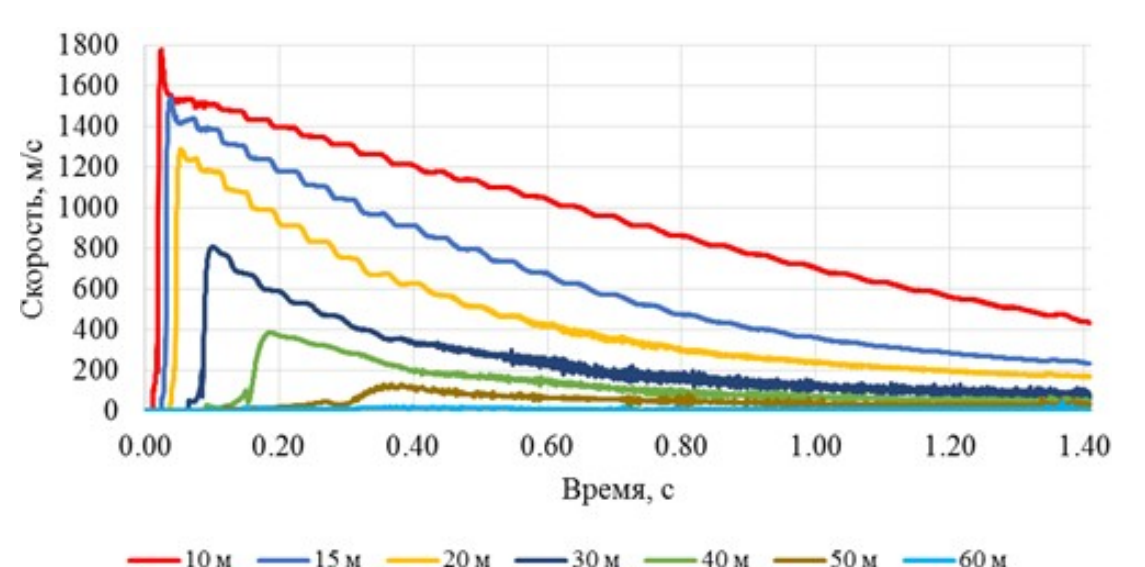
Поля скорости, давления, объемной доли радикала OH, объемной доли водорода и температуры в области истечения на моменты времени 0.02, 0.1, 0.68, 1 и 1,4 с



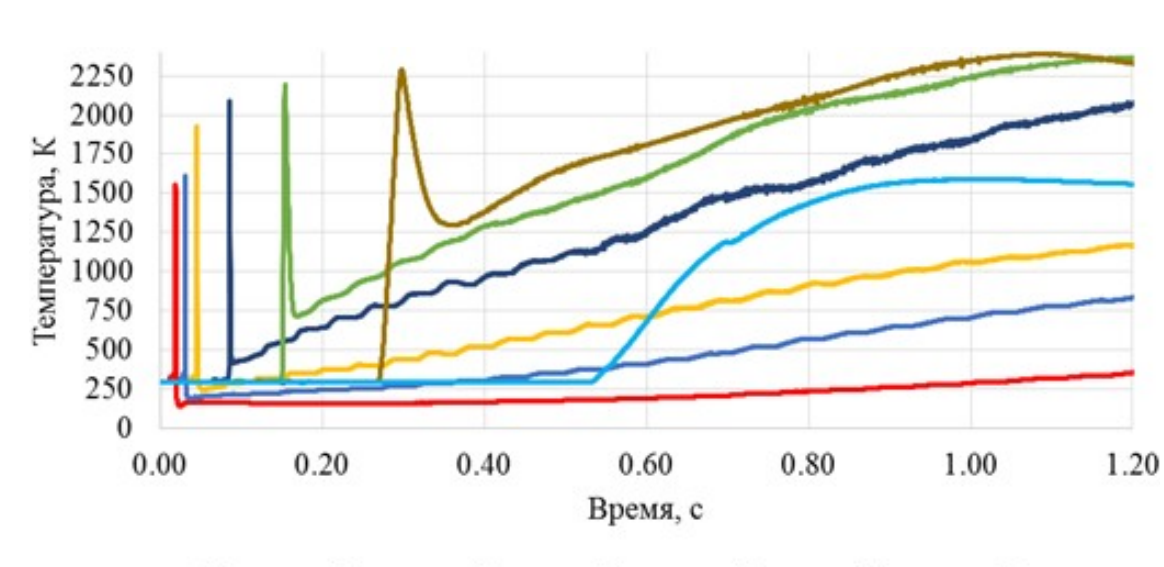
Зависимость давления в баллоне от времени



Зависимости давления от времени в точках, расположенных вдоль оси струи



Зависимости скорости от времени в точках, расположенных вдоль оси струи



Зависимости температуры от времени в точках, расположенных вдоль оси струи

Результаты Расчета №2 (истечение вниз)

1) Воспламенение водорода не происходит, вследствие вытеснения окислителя из-под баллона, при высоте расположения 1 м и 2 м от грунта!

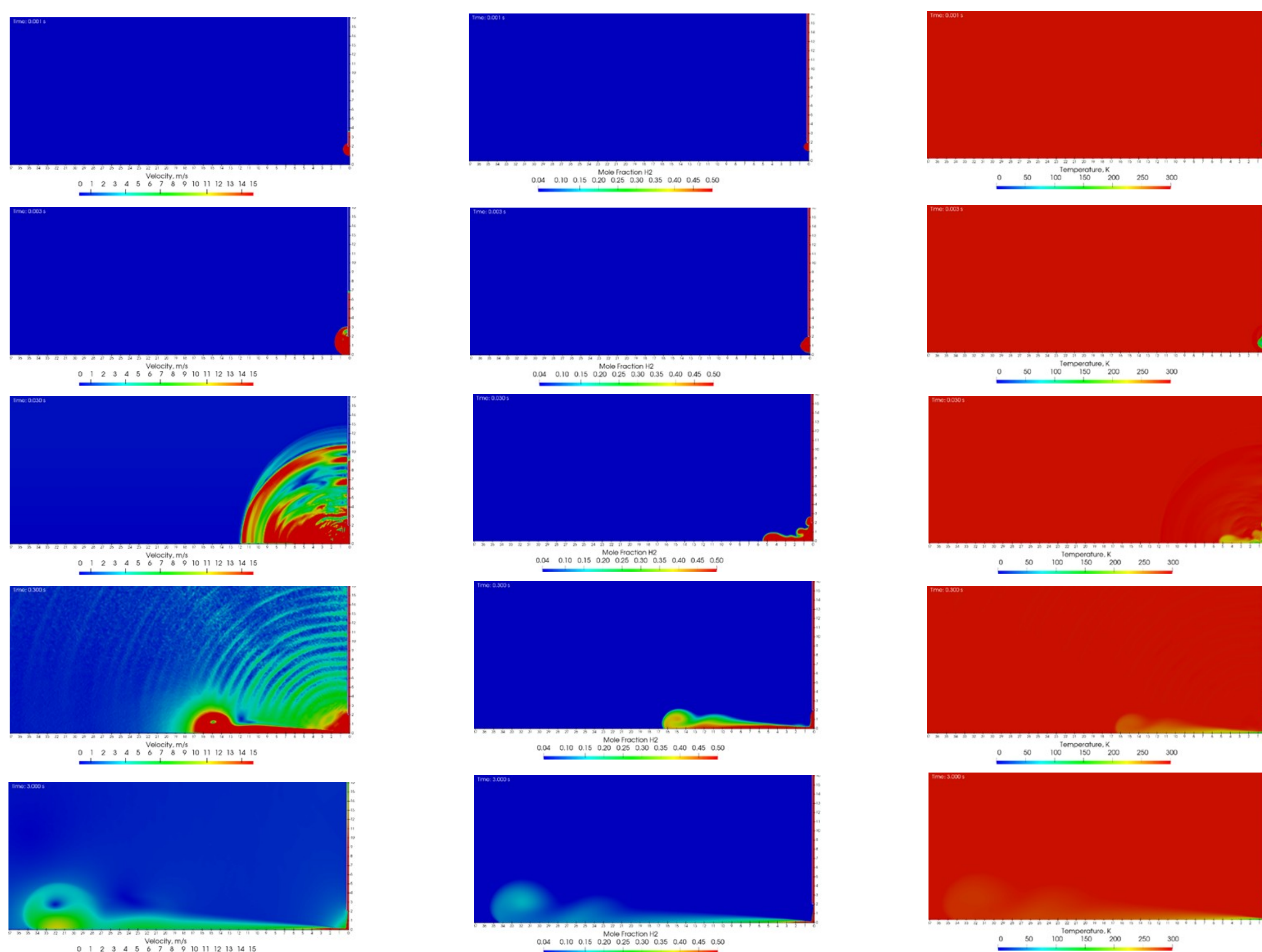
2) Струя, ударяясь о грунт, распространяется вдоль него на расстояние 40 м в радиусе от аварийного баллона, где поток начинает завихряться.

3) В начальный момент формируется сверхзвуковая струя. Система скачков уплотнения на начальном ее участке взаимодействует с поверхностью, что приводит к волнообразному изменению давления и скорости вблизи поверхности, а также возникновению отраженных волн. С падением давления в баллонах снижаются параметры струи, уменьшается длина ее начального участка и когда она становится меньше расстояния до грунта – отраженных волн больше не возникает.

4) Наибольшее ударно-волновое воздействие испытывает поверхность грунта под баллоном (амплитуда волны 0,43 МПа).

5) В бочке Маха, достигающей 1 м в длину, температура составляет несколько десятков кельвинов. В результате этого истекающий водород имеет достаточно низкую температуру и, смешиваясь с воздухом, нагревается до температуры окружающей среды только на 20 м

6) Разгрузка баллонов происходит так же, как и при истечении вверх, вследствие сверхзвукового характера струи.



Поля скорости, объемной доли водорода и температуры в области истечения на моменты времени 0.001, 0.003, 0.03, 0.3 и 3 с

[1] [Электронный ресурс]. – <http://www.OpenFOAM.org>.

[2] Soave, G. 1972. "Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State", Chem. Eng. Sci., 27, pp. 1197-1203.

[3] [<http://www.lerc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/>]