

## ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВОЗБУЖДАЕМОЙ БЫСТРОЛЕТЯЩИМ ТЕЛОМ

Бедарев И.А.<sup>1,2</sup>, Темербеков В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20*

Одной из важнейших задач взрыво- и пожаробезопасности на сегодняшний день является оценка энергии, необходимой для возбуждения детонации. Уже существует ряд теоретических моделей, используя которые можно спрогнозировать инициирование детонации и оценить последствия взрыва. Так, например, в работе А. А. Васильева [1] предложен критерий инициирования детонации быстролетящим телом. Предполагается, что для инициирования газовой детонации телом, летящим с высокой скоростью, необходимо чтобы работа сил аэродинамического сопротивления на единицу длины тела была не меньше чем минимальная энергия инициирования цилиндрической детонации в рассматриваемой смеси при данных условиях (давление, температура).

Рассматриваемая в [1] модель была проверена по экспериментальным данным. Результаты проверки показали, что такой подход может быть использован для приблизительной оценки возможности возбуждения детонации. Для дальнейшей проверки данного подхода необходимо большее количество экспериментальных данных. Однако экспериментальные исследования детонации затруднены из-за высокой стоимости и потенциальной опасности. В настоящее время широкое распространение получили численные методы решения подобных задач. Использование различных программ и пакетов для численного моделирования течений с физико-химическими превращениями позволяет не только обезопасить ученых от несчастных случаев, но также приводит к уменьшению затрат на проведение экспериментов. Несмотря на то, что такой подход, также как и теоретические модели, требует проверки и сопоставления с экспериментом, численное моделирование зарекомендовало себя как надежный способ интерпретации природных явлений.

Целью настоящей работы является сопоставление математической модели с теоретической для задачи об инициировании и стабилизации наклонной детонации снарядом малого диаметра, летящим со сверхзвуковой скоростью в водород-кислородной смеси, разбавленной аргоном.

Математическая модель включает в себя осреднённые по Фавру уравнения Навье-Стокса для многокомпонентной газовой смеси с учетом химических реакций. Для моделирования химической кинетики в работе была использована приведённая кинетическая схема, включающая одну брутто-реакцию горения водорода в воздухе. В работе [2] данная кинетическая схема была верифицирована по экспериментальным данным о временах задержки воспламенения и скорости распространения детонационной волны при различных условиях. В качестве решателя использован программный комплекс ANSYS Fluent. Для аппроксимации по времени используется неявная схема второго порядка, а для аппроксимации по пространству – схема расщепления вектора потоков AUSM с противопотоковой аппроксимацией второго порядка точности.

В предыдущей работе [3] был проведен расчёт инициирования детонации с помощью шарика, метаемого в водород-кислородную смесь со скоростью  $V_p = 1.2 \div 1.5 M_{CS}$

целью верификации математической модели по экспериментальным данным [4]. Для приведенной кинетики в стехиометрической водород-кислородной смеси число Маха Чепмена-Жуге составляет  $M_{CJ} = 5$ . Расчёты проводились для различных значений давления. При моделировании определялись константы модели (предэкспоненциальный множитель и энергия активации) при которых результаты расчёта наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными.

В настоящей работе проведена оценка энергии инициирования газовой детонации по критерию, представленному в работе [1] по экспериментальным данным [4] и результатам расчета [3]. Результаты этой оценки представлены на рис. 1.

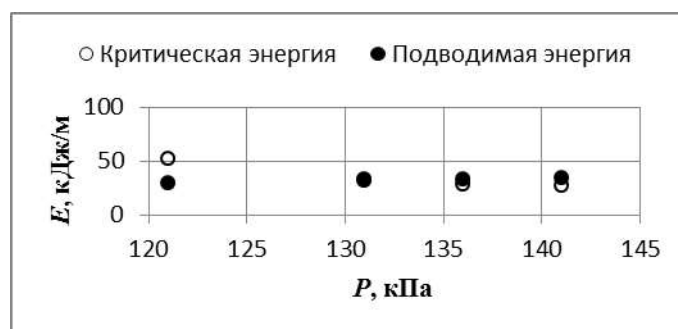


Рис. 1. Зависимости подводимой и критической энергии от начального давления

Также было проведено численное исследование влияния размеров метаемого тела на режимы детонации, при фиксированном начальном давлении. Расчеты проводились для давления  $P_0 = 141$  кПа и  $P_0 = 121$  кПа. Для давления  $P_0 = 121$  кПа диаметр снаряда увеличивался, а для давления  $P_0 = 141$  кПа диаметр уменьшался, соответственно увеличивалась и уменьшалась работа сил аэродинамического сопротивления при неизменной критической энергии инициирования газовой детонации. Результаты расчетов показали применимость теоретической модели для прогнозирования возбуждения детонации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610139-4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.А. Основные результаты исследований детонационного горения газовых смесей, возбуждаемого быстролетящим телом // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 5. С. 85 – 102.
2. Бедарев И.А., Федоров А.В., Рылова К.В. Применение детальных и приведенных кинетических схем для описания детонации водородо-воздушных смесей с разбавителем // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 5. С. 22 – 33.
3. Bedarev I.A., Temerbekov V.M., Fedorov A.V. Simulating the regimes of oblique detonation waves arising at detonation initiation by a small-diameter projectile // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26, No 1. P. 59 – 68.
4. Maeda S., Sumiya S., Kasahara J., Matsuo A. Scale effect of spherical projectiles for stabilization of oblique detonation waves // Shock Waves. 2015. Vol. 25. P. 141 – 150.