

РАСЧЕТ ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙСЯ ВОЛНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

П. А. Фомин, С. П. Тарагута

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведены численные расчеты инициирования волны пузырьковой детонации и выхода ее на стационарный режим. Впервые построена область существования самоподдерживающейся уединенной волны.

В [1] исследованы пределы распространения пузырьковой детонации и построены области существования самоподдерживающейся пузырьковой в зависимости от состава газа и объемной доли пузырьков k в двухфазной смеси. Эксперименты проведены как в системах, где горючее и окислитель находятся в газе (рис. 1), так и в системах, где горючее и окислитель перед фронтом волны находятся в разных фазах (окислитель — газ, горючее — жидкость). Несмотря на значительные успехи в моделировании пузырьковой детонации (см. библиографию в обзоре [2]), до сих пор не опубликовано ни одной работы, в которой указанные области существования волны были рассчитаны теоретически.

В [3] построена модель детонации в двухфазной гетерогенной смеси «пузырьки химически реагирующего газа — химически инертная жидкость», которая учитывает сжимаемость и вязкость жидкости, наличие периода индукции химической реакции и сдвиг химического равновесия. Цель настоящего сообщения — показать, что в рамках модели пузырьковой детонации [3] можно рассчитать границы рассматриваемой области существования волны в системе «пузырьки взрывчатого газа — жидкость».

Система уравнений [3] интегрировалась по явной схеме в лагранжевых массовых координатах с применением искусственной вязкости по методу [4]. Были рассчитаны параметры, структура и пределы детонации в системе «пузырьки водородокислородной газовой смеси — жидкость». Считалось, что жидкость состоит из смеси воды с глицерином, массовая доля глицерина 0,5. Использовались те же граничные условия и константы, что и в [3]. Начальные давления и температура полагались равными

293 К и 1 атм соответственно, начальный радиус пузырьков принимался равным 1,6 мм.

Как и в [1], под областью существования волны пузырьковой детонации будем понимать совокупность тех значений k и составов газа, при которых из первоначального инициирующего импульса формируется уединенная самоподдерживающаяся детонационная волна (ДВ), параметры и структура которой выходят на стационар и не зависят от величины инициирующего импульса. При этом инициирующее давление p_{init} выбиралось достаточным для возбуждения детонации.

Рис. 2 иллюстрирует характерный процесс формирования волны пузырьковой детонации от момента инициирования до выхода на режим распространения с постоянной ско-

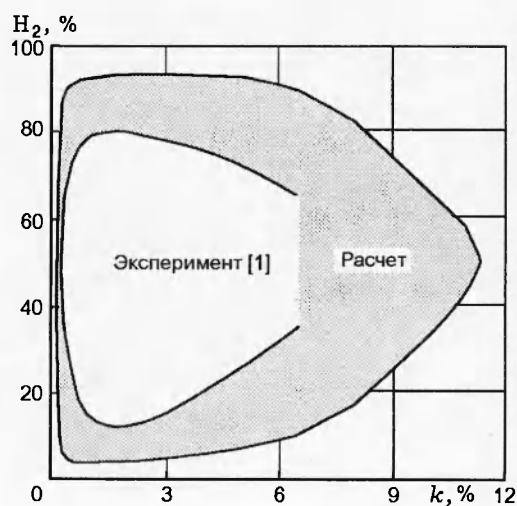


Рис. 1. Область существования пузырьковой детонации в смеси $H_2 - O_2$ (газ) — вода с глицерином (жидкость)

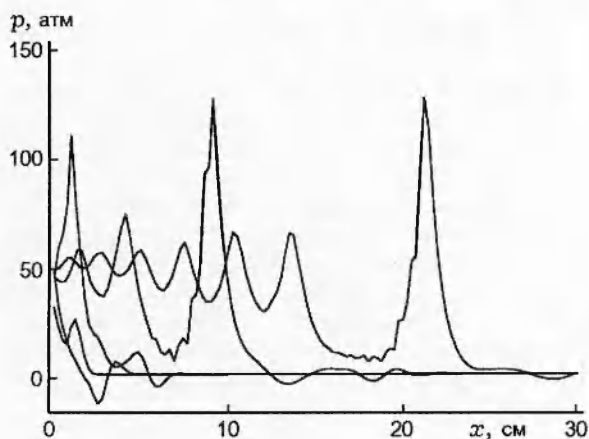


Рис. 2. Расчет формирования волны пузырьковой детонации

ростью (состав газа и концентрация пузырьков находятся внутри рассматриваемой области существования). Представлены профили давления волны в моменты времени 12, 25, 60, 158 и 238 мкс после инициирования. Начальный состав газа в пузырьке: $2\text{H}_2 + \text{O}_2$; p — давление в жидкости. Волна распространяется слева направо, $k = 2\%$. Видно, что после инициирования формируется ДВ, амплитуда которой заметно превышает инициирующее давление. Она распространяется со скоростью большей, чем скорость инициирующей волны. На расстоянии ≈ 10 см происходит заметный «отрыв» ДВ, о чем свидетельствует участок между ДВ и инициирующей волной, где давление существенно падает. Этот «отрыв» увеличивается по мере распространения волны. Параметры и структура ДВ выходят на стационар и не зависят от инициирующего давления.

На рис. 3,а приведена расчетная зависимость скорости волны u_0 от объемной доли пузырьков в системе. Взрывчатая смесь газа в пузырьке имела состав $2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Здесь же приведены экспериментальные результаты [1, 5, 6]. Отметим неплохое соответствие расчетов эксперименту.

Получено, что при концентрации водорода 0,1 и 10 % отрыва ДВ от инициирующего импульса не происходит и самоподдерживающаяся уединенная волна не формируется ни при каких значениях p_{init} , хотя при достаточно больших значениях воспламенения пузырьков происходит. Таким образом, при данном содержании водорода в газе указанные значения являются нижним и верхним концентрационны-

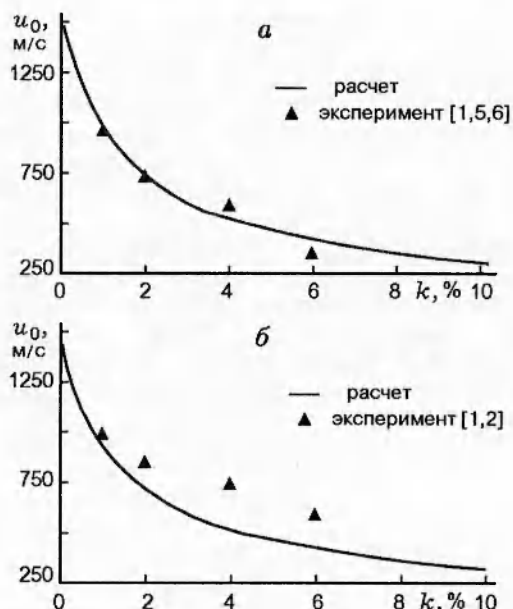


Рис. 3. Зависимость скорости пузырьковой детонации от концентрации газовой фазы в смесях $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ (газ) — вода с глицерином (жидкость) (а) и $\text{H}_2 + 2\text{O}_2$ (газ) — вода с глицерином (жидкость) (б)

ми пределами существования самоподдерживающейся ДВ. Нижний предел связан с малым энерговыделением в среде, верхний предел — с сильным затуханием ДВ.

Аналогичные расчеты сделаны при концентрации водорода $0 \div 100\%$. Полученная граница области существования самоподдерживающейся ДВ нанесена на рис. 1. Видно, что расчет дает несколько большую область существования, чем эксперимент.

В рамках используемой теоретической модели не удается объяснить установленную в [1, 5–7] зависимость параметров волны, в частности ее скорости и области существования, от диаметров пузырьков и вязкости жидкости. По-видимому, это связано и с тем, что модель [3] построена в предположении сферичности пузырьков и без учета тепло- и массообмена между фазами. С этим же, на наш взгляд, связано отличие (в меньшую сторону) расчетных значений скорости волны от экспериментальных в смеси $\text{H}_2 + 2\text{O}_2$ (газ) — вода с глицерином (жидкость) (рис. 3,б). Дело в том, что при испарении жидкости, которое всегда имеет место, глицерин может вступать в реакцию с «лишним» (по сравнению со стехиометрией) кислородом и тем самым увеличивать скорость волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинаев А. В., Сычев А. И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия существования волны детонации в системах жидкость — пузырьки газа // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 6. С. 76–84.
2. Кедринский В. К. Волновые процессы и динамика структуры неоднородных сред при импульсном нагружении // Прикл. механика и техн. физика. 1987. Т. 38, № 4. С. 111–139.
3. Троцюк А. В., Фомин П. А. Модель пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 129–136.
4. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
5. Пинаев А. В., Сычев А. И. Гетерогенная самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками газа // Детонация и ударные волны. Черноголовка, 1986. С. 107–111.
6. Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость — пузырьки газа: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева. Новосибирск, 1986.
7. Сычев А. И. Влияние размера пузырьков на характеристики волн детонации // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 83–91.

Поступила в редакцию 21/XII 1998 г.
