

УДК 662.612.32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА ОБЛАКА ЧАСТИЦ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

© 2011 г.

Д.А. Тропин, А.В. Федоров

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

d.a.tropin@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Исследуется подавление детонации путем вброса инертных частиц в реагирующую газовую смесь, по которой распространяется детонационная волна. Определена картина возникающего детонационного течения и сценарий его подавления. Найдены условия его подавления, то есть рассчитана минимальная длина облака/фильтра частиц, которое полностью гасит детонационную волну. Исследовано влияние изменения объемной концентрации частиц в облаке на эффективность подавления детонации. Оказалось, что определяющим параметром является длина облака, на котором происходит гашение волны воспламенения–горения. Показано, что для различных конфигураций распределения объемной концентрации частиц в облаке эта длина примерно одинаковая.

Ключевые слова: подавление детонации, математическое моделирование, смесь реагирующих газов и инертных частиц.

1. Постановка задачи

Рассмотрим ударную трубу, заполненную газовой смесью водорода и кислорода, а также распределенными в пространстве частицами. Пусть по смеси распространяется ударная волна (УВ). При некоторых условиях на число Маха УВ параметры смеси превышают критические для воспламенения и горения значения и происходит дефлаграционно-детонационный переход. После инициирования детонационной волны (ДВ) она входит в облако частиц, где распадается на замороженную ударную волну (ЗУВ) и отстающую волну (фронт) воспламенения/горения (ВВГ). Ставится задача подавления детонации в следующем виде: определить минимальную длину облака частиц L_* такую, чтобы после выхода волнового процесса из облака он не смог бы вновь инициировать детонацию в смеси. В одномерной нестационарной постановке динамика смеси описывается уравнениями неравновесной газовой динамики в двухскоростном, двухтемпературном приближении. Для описания химических превращений в ДВ используется модель с детальной кинетикой [1].

2. Однородная по пространству объемная концентрация частиц в облаке

Первоначально расчеты были проведены при однородной по пространству объемной кон-

центрации частиц в облаке с объемной концентрацией $m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ и диаметром $d = 10^{-4}$ м. Данная объемная концентрация является критической для данного диаметра частиц и была определена в [1]. При малых размерах облака, $\bar{L} = L/L_* = 0.067 - 0.134$, где L_* – критический размер облака (который будет определен позднее), распада ДВ, когда фронт воспламенения/горения отстает от ЗУВ, внутри облака еще не наблюдается. Однако характерного треугольного профиля давления после входа ДВ в облако частиц также не наблюдается, т.е. при таких размерах облака только начинается разрушение структуры ДВ. На длине, большей $\bar{L} = 0.134$, начинает формироваться структура в виде ЗУВ и отстающего от нее фронта воспламенения/горения. Это означает, что $\bar{L} = 0.134$ является предкритическим значением длины облака, которое приводит к расщеплению детонационного фронта. Чтобы понять механизм распада ДВ, рассмотрим облако частиц длиной $\bar{L} = 0.33$. При таком размере фильтра полного гашения ВВГ не происходит, однако отчетливо виден распад ДВ на ЗУВ и отстающий фронт воспламенения/горения. Следует отметить, что и ВВГ в облаке распространяется нестационарно, ее скорость уменьшается. После выхода ЗУВ из облака воспламенения за ее фронтом не происходит, так как температура газа ниже критической температуры воспламенения и составляет 500 К. Однако после выхода ВВГ из облака частиц, ее

скорость быстро увеличивается и она догоняет ЗУВ. В результате происходит резкое увеличение давления и температуры и формирование пересжатой ДВ, которая в дальнейшем выходит на режим Чепмена – Жуге. Облака с размером до $\bar{L} = 1$ не разрушают ДВ. При размере облака $\bar{L} = 0.66$ после слияния ВВГ и ЗУВ формируется ДВ, однако при размере облака в 30 см наблюдается подавление ДВ. После выхода из облака частиц волны горения инициирование ДВ не наблюдается. Примем поэтому в качестве критического значение $L_* = 30$ см.

3. Неоднородная по пространству объемная концентрация частиц в облаке

Также интересным представляется изучить влияние увеличения и уменьшения объемной концентрации частиц в облаке при фиксированном значении длины облака, равном критическому. Пусть в первом случае концентрация на передней кромке облака равна $m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$ и линейно уменьшается до значения $m_2 = 10^{-4}$ вдоль облака. Проведенные расчеты показали, что для такого распределения объемной концентрации происходит гашение детонации. Хотя объемная концентрация частиц в облаке уменьшается, скорость ВВГ не возрастает; ВВГ движется с дозвуковой скоростью по области с уменьшающейся m_2 . Следовательно, можно провести аналогию со сверхзвуковым соплом. В данном случае роль площади поперечного сечения сопла будет играть объемная концентрация газовой смеси $m_1 = 1 - m_2$. Таким образом, имеем дозвуковое течение в расширяющемся канале, но с теплоподводом за счет химической реакции и трением газа в облаке. По-видимому, теплоподвод и трение в данном случае не являются определяющими, поэтому дозвуковой поток в расширяющейся области тормозится (геометрическое воздействие).

Во втором случае зададим объемную концентрацию частиц, линейно возрастающую от значения $m_{20} = 10^{-4}$ на передней кромке облака, которое меньше критического, до критического значения $m_{2k} = m_2^* = 2 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, детонация в части такого облака может существовать. Действительно, первые 20 см облака ДВ все еще существует, происходит только ее ослабление. По аналогии, описанной выше, мы имеем сверхзвуковое течение в сужающемся канале, в котором происходит торможение потока. При приближении ДВ к области с критической концентрацией наблюдается ее распад. Это начинает происходить на расстоянии око-

ло 10 см от конца облака. Но как уже было показано ранее, облака длиной 10 см недостаточно для гашения ДВ, и после прохождения облака наблюдается вторичное инициирование ДВ. При повышении m_{20} до значения 10^{-3} также наблюдается инициирование ДВ.

Изучен вариант детонационного течения в облаке, в котором объемная концентрация частиц сначала возрастает от значения m_{20} до критической m_2^* , а затем уменьшается до значения $m_{2k} = m_{20}$. Рассмотрены два вида распределения объемной концентрации частиц в облаке: линейно меняющаяся и меняющаяся в соответствии с распределением Гаусса. В случае линейно меняющейся объемной концентрации частиц подавление ДВ начинается от размеров облака 40 см, в случае распределения Гаусса эта длина получилась равной 60 см. В свою очередь расстояние, на котором происходит гашение ВВГ, составляло 25 см для линейного распределения и 35 см для распределения Гаусса. Это отличие вызвано тем, что во втором случае объемная концентрация частиц возрастает в начале облака и уменьшается в конце облака быстрее, чем в первом случае. Таким образом, ВВГ в последнем случае 30% расстояния движется по области с малыми концентрациями частиц, которые неэффективно гасят ВВГ.

4. Выводы

1. Определена минимальная длина облака/фильтра частиц такая, что после выхода комплекса замороженная ударная волна + волна воспламенения и горения из фильтра не наблюдается дефлаграционно-детонационного перехода.

2. Выявлено, что уменьшение объемной концентрации частиц вдоль облака от критической до некоторой меньшей приводит к менее эффективному гашению ДВ по сравнению с вариантом постоянной предельной концентрации.

3. При немонотонном распределении объемной концентрации частиц показано, что определяющим параметром в процессе подавления детонации является не объемная концентрация частиц и их масса, а длина, на которой происходит гашение ВВГ.

Список литературы

1. Федоров А.В., Тропин Д.А., Бедарев И.А. Математическое моделирование подавления детонации водород-кислородной смеси инертными частицами // ФГВ. 2010. Т. 46, №3. С. 103-115.

**DETERMINATION OF THE CRITICAL SIZE OF A PARTICLE CLOUD, NECESSARY
FOR THE SUPPRESSION OF GAS DETONATION**

D.A. Tropin, A.V. Fedorov

In this study, the suppression of detonation by injecting inert particles in a reactive gas mixture is investigated. Conditions for the suppression of detonation are found, i.e. the minimum length of the particle cloud, which completely quenches the detonation wave, is calculated. The effect of changing the volume concentration of particles in the cloud on the effectiveness of the suppression of detonation is studied. It is found that the determining parameter is the length of the cloud, at which quenches the wave of ignition and combustion. It is shown that for different configurations of the volume concentration distribution of the particles in the cloud this length is the same.

Keywords: suppression of detonation, mathematical modeling, mixture of reactive gases and inert particles.