

Задача 4. Исследование взрыва газовых и конденсированных взрывчатых веществ в воздухе

1. Теоретическое введение

Направление исследований физико-химической гидродинамики, связанное с физикой взрыва занимает особое место, как по количеству проведенных исследований, так и по внедрению разработок этих исследований в практику. Это связано, прежде всего, с техническими аспектами и широкой областью применимости результатов исследований.

В первую очередь, конечно, важны военные приложения, однако значительное место занимают и мирные области применения, например, в строительстве или при добыче полезных ископаемых. Ведутся и перспективные разработки, связанные, например, с созданием двигателей, основанных на взрывных и детонационных процессах. Физику взрыва по этим причинам изучают во многих учебных заведениях от военных училищ и строительных институтов до университетов. Обобщение материала по физике взрыва дано, например, в монографиях (Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н., 2004; Физика взрыва (под ред. Л. П. Орленко), 2004).

Целью настоящей работы практикума является знакомство с физическими основами взрывных явлений. Экспериментальные исследования в этой области осложнены необходимостью строгих мер техники безопасности, поэтому математическое широко используется моделирование и создание анимационных программ. Такой подход позволяет ознакомиться с особенностями физико-химических и газодинамических процессов при распространении взрывной волны.

Работа включает следующие анимационные расчеты:

1. Детонация в газовой смеси.
2. Особенности детонации в конденсированном ВВ.
3. Взрыв в воздухе (газовая смесь – воздух и конденсированное ВВ – воздух).

4. Особенности детонации при сферической геометрии задачи.

В ударной трубе, используемой в задачах 1 и 2, образование ударной волны происходило при разрыве диафрагмы в камере высокого давления, то есть в качестве источника энергии использовался сжатый газ. Однако на практике очень важную роль играет другой способ получения ударной волны, при котором энергия выделяется в результате экзотермической химической реакции. Предлагаемая задача выполняется после работы по исследованию распространения ударной волны в ударной трубе, поэтому весь теоретический материал, связанный с теорией ударной волны, в данном описании не повторяется. Ниже изложены только основные представления о взрыве и детонации.

1.1 Взрыв и детонация.

Взрыв – это очень быстрое выделение энергии в ограниченном объеме, сопровождаемое сильным возмущением окружающей среды, включая ее разбрасывание и разрушение. Наиболее характерными являются взрывы, при которых на начальном этапе внутренняя химическая (или ядерная) энергия превращается в тепловую.

Сам процесс взрыва в среде, которая может испытывать химические превращения, происходит следующим образом. После инициирования химической реакции локальным резким внешним воздействием граница области химического превращения, сопровождаемого выделением теплоты, начинает распространяться в среде со скоростью, превышающей скорость звука в данном веществе. Формируется сложное образование, состоящее из мощной ударной волны, возникшей в момент взрыва и зоны химического превращения, которое называется детонационной волной. Выделяющаяся в результате химической реакции теплота поддерживает ударную волну, не давая ей затухнуть. Таким образом, возникает установившийся (стационарный) режим распространения детонации. Скорость распространения волны детонации в газах составляет 1-3 км/с.

После выхода детонационной волны из химически активной среды, например, в воздух, происходит формирование обычной ударной волны, рассмотренной в предыдущей задаче практикума.

В первом задании рассмотрено формирование детонационной волны в **газовой смеси** $H_2 - O_2$ (гремучей) и проанализированы особенности структуры детонационной волны и ее отличия от ударной. При численном моделировании исследуется формирование детонационной волны в такой смеси и выход волны на стационарный режим распространения.

Во втором задании исследуются особенности распространения детонации в **конденсированном ВВ**. Принципиального отличия от предыдущего случая нет, однако существенным образом отличается уравнение состояния. Кроме того, при сгорании конденсированного ВВ образуется гораздо большее количество газовых продуктов реакции просто из-за того, что плотность конденсированного ВВ гораздо выше плотности газовой смеси, исследованной в предыдущем разделе.

Третье задание посвящено исследованию выхода детонационной волны в среду без энерговыделения, в качестве которой рассматривается обычный воздух. Условия распространения резко меняются, и происходит **формирование обычной ударной волны**. Газовые и конденсированные ВВ имеют при этом особенности, которые и будут рассмотрены на примере двух разных расчетов.

В трех первых разделах рассматривались процессы в трубе, позволяющие проанализировать линейное одномерное распространение. Однако не менее важным для практики является исследование особенностей взрыва в **сферически симметричной** задаче. В случае такой геометрии при распространении волны происходит ее ослабление из – за увеличения площади фронта. Точнее, при распространении во взрывчатом веществе такого ослабления не происходит, потому что пропорционально увеличивается и количество вовлекаемого в процесс вещества, однако после

выхода в воздух волна начинает ослабевать. Такой расчет проводится в четвертом задании.

1.2 Краткие сведения о взрывных химических реакциях.

В процессе взрыва в среде протекает экзотермическая химическая реакция. Проанализируем энерговыделение при такой реакции. Рассмотрим, например, гремучую смесь – смесь водорода и кислорода, которые взаимодействуют с образованием воды. Эта реакция имеет в настоящее время и огромное практическое значение в связи с попытками создания промышленных образцов водородного двигателя:



где энтальпия образования $\Delta H = 572$ кДж/моль, если вода образуется в жидком состоянии. Данных по энтальпиям образования вполне достаточно для расчета термодинамических характеристик реакции, но при одном условии – если известен состав конечных продуктов. Обычно в учебниках отмечается, что тепловой эффект реакции зависит только от начального и конечного состояния веществ и не зависит от промежуточных стадий процесса. Это не совсем правильное утверждение, поскольку от промежуточных стадий процесса может зависеть конечное состояние, а уже от конечного состояния будет зависеть тепловой эффект. Однако часто для расчета можно использовать стандартные методы физической химии.

Обычно считается, что при взрыве выделяется огромная энергия на единицу массы. Однако цифры говорят об обратном. Для рассмотренной выше гремучей смеси в пересчете на килокалории и килограммы получим 3783 ккал/кг. Для сравнения калорийность пищевых продуктов, например, макарон, составляет 3400 ккал/кг; теплота сгорания угля – 6500 ккал/кг. Для твердых взрывчатых веществ эти величины существенно меньше. Так, для октогена величина выделяемой энергии составляет примерно 1250 ккал/кг, для широко используемого тротила она варьируется от 650 до 1090 ккал/кг. Получается, что взрыв – не самый мощный источник энергии. Это связано, прежде всего, с тем, что взрывчатое вещество должно содержать необходимый для сгорания

кислород внутри себя. При взрыве нет возможности подводить кислород из окружающей среды. Собственно, взрыв и происходит потому, что внутри вещества есть все необходимое для протекания реакции. Для сжигания 1 кг угля требуется примерно 2000 литров кислорода, то есть порядка 3 кг. Поэтому сгорает не 1 кг угля, а 4 кг смеси уголь – кислород. Для этой смеси теплота сгорания уже будет порядка 1600 ккал/кг. Угольная пыль в воздухе – это очень опасная взрывчатая смесь. Именно на примере этой смеси человечество впервые познакомилось с детонационными волнами - при взрывах в угольных шахтах. Величина 1600 ккал/моль вполне сравнима с соответствующими величинами для взрывчатых веществ. Это естественно, поскольку никаких «особенных» атомов в структуре самых известных взрывчатых веществ не присутствует. Это вполне обычные кислород, водород, азот и углерод - именно эти четыре элемента образуют все основные взрывчатые вещества. Например, формула тротила (тринитротолуола) - $C_7H_5N_3O_6$, гексогена (циклотриметилентринитроамин) - $C_3H_6N_6O_6$. Таким образом, с точки зрения энерговыделения, взрывчатые вещества отнюдь не являются рекорсменами.

Расчеты в рамках данной работы практикума будут производиться термодинамическими методами без учета скорости реакций. Это означает, что ширина зоны реакции будет считаться малой по сравнению с размерами системы.

2. Экспериментальная часть

Задание 1.

Первый расчет посвящен детонационной волне в газовой среде. Наиболее распространенный состав такой среды – это гремучая смесь (смесь кислорода с водородом), однако существует очень большое количество детонирующих газовых смесей, например, может рассматриваться смесь углеводородов с кислородом. В качестве среды для распространения может выступать любой газ с избыточной энергией во внутренних степенях свободы, например, газ в газовом разряде.

Детонационная волна – это совокупность ударной волны и зоны реакции за ее фронтом (рис. 1.4.1). Как и в ударной волне, процессы вязкости и теплопроводности важны только при формировании ударного фронта (отметим, что использование коэффициентов вязкости и теплопроводности для описания самого ударного фронта неправомерно, поскольку ширина ударного фронта порядка длины свободного пробега, однако именно поступательная релаксация формирует ударный фронт). Релаксационная зона может рассматриваться в рамках уравнений Эйлера с учетом энергосыделения.

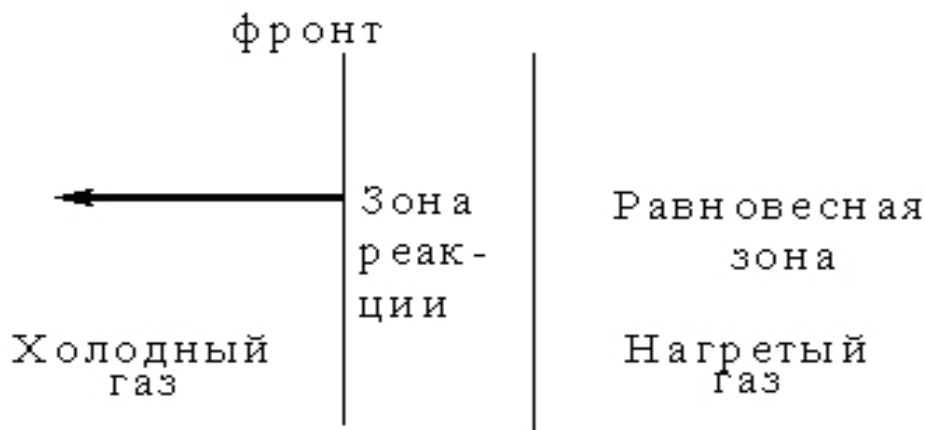


Рис.1.4.1. Структура детонационной волны.

Система уравнений непрерывности, движения и энергии имеет вид

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) &= 0, \\
 \rho \frac{dv}{dt} &= -\operatorname{grad} p, \\
 \frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1.4.2}$$

где v, p, ρ, h — скорость, давление, плотность, энтальпия газа, а полная производная учитывает, как обычно в гидродинамике, как производную по времени, так и производные по координатам. Отличие от случая ударной волны состоит в том, что в удельную энтальпию перед волной входит и

теплота экзотермической реакции. В простейшем случае, если считать, что выделившаяся при реакции теплота Q не зависит от конечного состояния системы (что верно только в некотором приближении), энтальпию можно записать в виде $h = f(p, \rho) + Q$. Функция f определяется свойствами вещества.

Для идеального газа, например $f(p, \rho) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}$, где γ - показатель адиабаты без учета химических реакций.

В данном задании будет рассматриваться решение системы уравнений (1.4.2) с учетом ударных разрывов при разной геометрии задачи и разных детонирующих веществах.

Плоская задача важна тем, что здесь существует стационарное решение, то есть существует решение, не зависящее от времени, в системе координат, связанной с фронтом волны. (Солоухин Р. И., 1963; Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. 1963).

Из первого уравнения системы (1.4.2) в этом случае получим $\frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0$ и

$$\rho v = const .$$

Аналогичные процедуры могут быть проделаны с уравнениями движения и энергии. В итоге получим

$$\begin{aligned} \rho v &= const = \rho_0 v_0 = C_1, \\ p + \rho v^2 &= const = p_0 + \rho_0 v_0^2 = C_2, \\ h + \frac{v^2}{2} &= const = h_0 + \frac{v_0^2}{2} = C_3. \end{aligned} \quad (1.4.3)$$

Уравнения (1.4.3) уже рассматривались ранее (см. описание задачи 1), поэтому их вывод здесь не обсуждается. Прямая Михельсона, получаемая из первых двух уравнений системы (1.4.2), остается такой же

$$p = C_2 - \rho v^2 = C_2 - C_1 v = C_2 - C_1^2 V, \quad (1.4.4)$$

где $V = 1/\rho$, однако, равновесная адиабата, описывающая множество конечных состояний, смещается вверх (рис. 1.4.2).

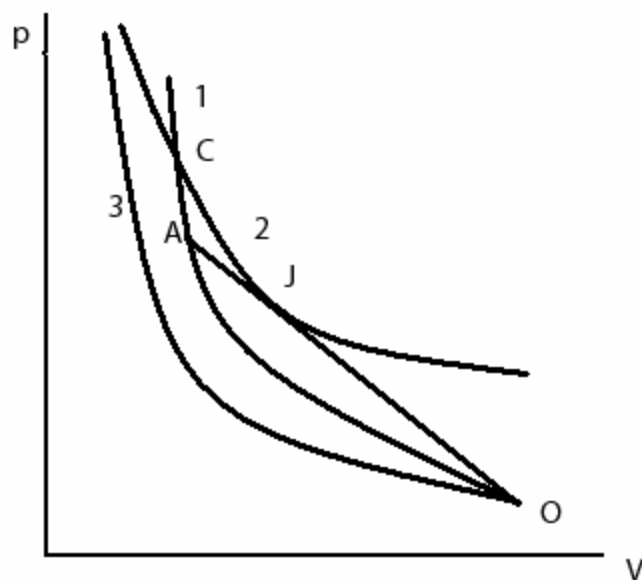


Рис.1.4.2. p - V - диаграммы для детонационной волны. OA – прямая Михельсона, 1 – замороженная адиабата, 2 – равновесная адиабата, 3 – равновесная адиабата при эндотермической реакции, соответствующая ударным волнам в релаксирующих средах.

Эта кривая называется равновесной адиабатой, хотя, как уже отмечалось в задачах, связанных с анализом ударных волн, она адиабатой не является. Название связано с ошибкой при первоначальном расчете. Пересечение прямой Михельсона с равновесной адиабатой дает решение задачи стационарного распространения детонационной волны. Из рис.1.4.2 видно, что существует минимальная скорость распространения детонационной волны, определяемое точкой касания прямой Михельсона равновесной адиабатой. Эта точка называется точкой Жуге (Jouget), а число Маха распространения детонационной волны называется числом Маха в точке Жуге. Эта скорость является характеристикой вещества, по которой распространяется детонационная волна. Важно отметить, что скорость распространения сохраняется постоянной и не зависит от начальных условий, то есть детонационная волна без наличия «подпорки» разгоняется до скорости, соответствующей числу Маха Жуге и далее распространяется с этой скоростью. Структура детонационной волны полностью аналогична структуре

ударной волны с релаксационной зоной. Сначала происходит ударный скачок и система переходит из точки О в точку А на замороженной адиабате. Затем начинается химическая реакция. Однако из-за экзотермичности этой реакции движение системы проходит не в направлении сжатия налево к равновесной адиабате без учета энерговыделения, а в противоположном направлении. Газ расширяется и нагревается. Давление немного снижается по сравнению с максимальным значением до начала реакции. Этот всплеск давления называется «химическим пиком». Если такая волна поддерживается поршнем (в реальности ему соответствует дополнительный сжатый толкающий объем), то осуществляются и режимы «пересжатой» детонации, которая, по мере увеличения числа Маха, все ближе и ближе приближается по своим свойствам к обычной ударной волне.

Не приводя полного вывода (его можно найти, например, в “Физике взрыва” под ред. Л.П. Орленко), отметим, что скорость детонационной волны в точке Жуге D, которая равна скорости набегающего на фронт потока v_0 в системе координат, связанной с фронтом, определяется формулой

$$D = \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{2} Q + c_{s0}^2} + \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{2} Q}, \quad (1.4.5)$$

где $c_{s0}^2 = \frac{\mathcal{P}}{\rho}$ - скорость звука в холодном газе перед фронтом. Отметим, что формула (1.4.5) – упрощенная и не учитывает разницу в показателях адиабаты слева и справа от разрыва. Рассмотрение особенно упрощается, если энерговыделение Q достаточно велико и скорость детонационной волны значительно превышает скорость звука, тогда во втором уравнении системы (1.4.4) можно пренебречь начальным давлением по сравнению с членом, содержащим квадрат скорости, а в формуле (1.4.5) – можно пренебречь скоростью звука и в итоге она преобразуется к более простому виду (Орленко Л.П., 2006)

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q}. \quad (1.4.6)$$

Приведенная теория относится к стадии стационарного распространения. В реальности после инициирования реакции сначала происходит выход на стационарный режим, а затем волна распространяется с постоянной скоростью.

Второй важный вопрос – это движение газа за фронтом детонационной волны. Легко понять, что газ не может двигаться с постоянной скоростью во всем объеме прореагировавшего газа, поскольку у торцевой стенки он должен иметь нулевую скорость. Эта же проблема возникала и в случае анализа распространения ударной волны. Ответ состоит в том, что при формировании детонационной волны одновременно происходит образование и волны разрежения. Взаимодействие этой волны с торцом трубы и с детонационным фронтом и формирует профили гидродинамических параметров в пространстве, занимаемом прореагировавшим газом.

В работе моделируется как выход на стационарный режим, так и анализ получаемой скорости волны в режиме Жуге. Рассматриваются разные смеси, для каждой из которых делается расчет реакции (моделируется анимационный эксперимент) и вычисляется итоговая скорость детонационной волны. Осуществляется проверка соотношения (1.4.6) для четырех различных газовых смесей и строится график зависимости числа Маха $M_J = D/c_{s0}$. Необходимо отметить в каждом случае и расстояние, на котором происходит выход на стационарный режим распространения. Находится также зависимость давления газа в точке Жуге в зависимости от числа Маха. Эта зависимость потребуется для сравнения с другими анимационными экспериментами. Кроме того, проводится анализ течения за детонационным фронтом.

Выполнению заданий должно предшествовать знакомство с расчетной программой (описание программы выполнено отдельно и выдается при записи в спецпрактикум). Студенту сначала необходимо освоить процесс задания начальных и граничных условий, выбор геометрии задачи, а также параметров ВВ и окружающего газа. Эти навыки проверяются у каждого студента при

сдаче допуска к задаче. Далее осуществляется переход к непосредственному моделированию физического процесса.

Теперь последовательно рассмотрим этапы выполнения работы по заданию 1.

Порядок выполнения работы по заданию 1.

1. Расчет инициирования и выхода на стационарный режим плоской детонационной волны для одной газовой смеси.

Получение графика зависимости скорости фронта от расстояния до торца трубы для первой рассчитываемой газовой смеси. Для этой цели необходимо проведение пробных расчетов и подбор необходимой сетки, а также расстановка «датчиков». Датчики позволяют, как и в реальном физическом эксперименте, зафиксировать положение фронта и момент времени, когда фронт прошел через соответствующий датчик. Следует, однако, помнить, что точность работы датчика определяется шагом сетки, выбранной для расчета. Слишком большой шаг приведет к неточному расчету, слишком малый – к большому расчетному времени. Таким образом, чтобы получить реперные точки и вычислить среднюю скорость по каждой базе, необходимо расставить несколько пар датчиков. Скорость волны рассчитывается как расстояние между датчиками, поделенное на время между срабатыванием этих датчиков, что полностью соответствует измерениям в реальном физическом эксперименте.

Далее необходимо на основе этих точек построить график зависимости скорости волны от расстояния от торца.

2. Проведение сравнения полученных результатов с вычислениями по формулам (1.4.4) и (1.4.5). Необходимо пояснить возникающие отличия и проанализировать, занижают или завышают скорость детонационной волны приведенные упрощенные формулы.

3. Расчет профилей давления в зоне продуктов детонации. Такие профили необходимо построить для нескольких моментов времени. Первый момент времени соответствует начальной стадии формирования волны, второй –

точке, соответствующей середине длины, на которой происходит формирования детонационной волны, а третий профиль необходимо построить в области, где волна полностью сформировалась. Эти профили позволят определить положение волн разрежения в разные моменты времени.

4. Построение графиков скорости для нескольких газовых смесей и исследование влияния энерговыделения на скорость разгона волны и стационарную скорость распространения. Данный пункт выполняется в полном соответствии с предыдущим расчетом. Итогом расчетов должно стать получение нескольких графиков скорости волны в зависимости от расстояния до торца для газовых смесей, сильно отличающихся по своим параметрам. Необходимо качественное сравнение полученных результатов, а также сравнение результатов с расчетами по формулам (1.4.4) и (1.4.5). Представление результатов осуществляется в соответствии с п.1-4 задачи.

Задание 2.

Второй численно-анимационный эксперимент связан с анализом распространения детонационной волны в конденсированном веществе. Коренным отличием от предыдущего случая является очень большое количество вещества, то есть очень большая плотность и большое энерговыделение на единицу объема, которое на одну молекулу остается по порядку величины той же, что и в случае газовой смеси, но за счет увеличения плотности резко увеличивается при пересчете на объем. В результате реакции за фронтом детонационной волны, при переходе в газообразное состояние, эта плотность приводит к очень большим (по сравнению со случаем газовой детонации) итоговым давлениям в точке Жуге. Это отличие создает и большую разницу при выходе детонации в воздух, потому что количество образовавшихся продуктов взрыва очень велико, однако этот вопрос будет подробнее рассмотрен в следующем разделе.

Типичные параметры детонационной волны в конденсированном ВВ за фронтом – это температура порядка нескольких тысяч градусов и давления

порядка 10^5 атм (10 ГПа), то есть продукты детонации представляют собой очень плотный газ, который плохо описывается уравнением состояния для идеального газа. Существует несколько вариантов уравнений состояния для реальных газов, наиболее известная форма – это уравнение Ван-дер-Ваальса (нужно записать в едином с остальными виде)

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \frac{m}{\mu} RT \quad (1.4.7)$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса учитывает второй вириальный коэффициент a в стандартном разложении. Этот коэффициент возникает за счет парных взаимодействий (ван-дер-ваальсовых сил). Однако в общем случае при увеличении плотности необходимо учитывать и члены более высоких порядков. Здесь мы не будем подробно останавливаться на этом вопросе, поскольку он подробно рассматривается в курсах по физике жидкостей.

Отметим, что общая схема расчета мало отличается от ранее рассмотренной, поскольку начальным давлением перед волной можно, как правило, пренебречь. Поэтому связи параметров (1.4.3) остаются в силе. Отличия состоят только в использовании другого уравнения состояния и других значений параметра тепловыделения, которое примерно на порядок больше, чем для газовой детонации. В итоге конечная адиабата расположена существенно выше на p - V -диаграмме, а скорости волны в режиме Жуге оказываются в диапазоне 5-10 км/с.

Так же, как и в первом упражнении, необходимо рассмотреть выход на стационарный режим (рассчитать критический диаметр детонации), а также зависимость скорости волны для различных веществ.

Если пренебречь начальным давлением p_0 во второй формуле системы (1.4.3) и предположить, что начальная энтальпия определяется, в основном, энергосвыделением Q , то эта система также может быть решена, основная проблема будет состоять только в том, что зависимость $h(p, \rho)$ теперь будет не столь простой. Подробности вычисления скорости волны приведены в “Физике взрыва” под ред. Л.П. Орленко.

Основная цель расчета – провести сравнение со случаем газовой среды.

Порядок выполнения работы по заданию 2.

В целом, отличие от предыдущего задания состоит только в используемом ВВ. Поэтому порядок расчета в данном задании полностью соответствует порядку, приведенному в задании 1. Также нужно сделать сравнение с данными, рассчитанными по формуле (1.4.6). Для этой цели необходимо рассчитать показатель адиабаты в точке за фронтом детонационной волны. Сравнение с результатами задания 1 позволяет понять, как меняются абсолютные значения давления и скорости при использовании конденсированных веществ.

Задание 3.

Детонация в сферически-симметричном представлении особенно интересна в теории взрыва, поэтому необходимо рассмотреть особенности такого распространения для газовой и конденсированной фаз.

Система уравнений непрерывности, движения и энергии (1.4.2) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\rho v r^2)}{\partial r} &= 0, \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} &= -\frac{\partial p}{\partial r}, \\ \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial r} - \frac{v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} &= 0. \end{aligned} \tag{1.4.8}$$

Хорошо видно, что рассмотренный в плоском случае стационарный режим теперь не реализуется – вместе с изменением расстояния от центра r меняются параметры системы. Таким образом, приходится решать нестационарную задачу. Инициирование реакции происходит в небольшом объеме (точке) далее решается система уравнений (1.4.8) как для газовой, так и для конденсированной среды. Цель расчетов состоит в том, чтобы получить профили скоростей в обоих случаях и сравнить получаемые скорости со

скоростями в плоском случае. Кроме того, можно провести соответствие между различными стадиями формирования детонационной волны.

Порядок выполнения работы по заданию 3.

Как уже отмечалось, в случае сферической детонационной волны не существует стационарного решения, однако можно выделить две области, связанные с начальным усилением детонационной волны и ее распространением на больших расстояниях от точки инициирования.

1. Проведение пробных расчетов для газовой смеси с целью определения оптимального положения датчиков, измеряющих скорость детонационной волны. Необходимо отметить, что для расчета нужно использовать ту же смесь, которая выбиралась в задании 1.

2. Построение графика зависимости скорости волны от расстояния до точки инициирования детонации. Сравнение полученного графика с графиком для плоского случая.

3. Построение трех профилей давления в зоне продуктов детонации. Сравнение профилей давления с плоским случаем.

4. Проведение расчетов для конденсированного ВВ. Построение графика зависимости скорости детонации от расстояния до точки инициирования детонации. Построение профилей давления. Сравнение результатов с плоским случаем.

Задание 4.

Выход детонационной волны из вещества в окружающую среду означает переход от детонационной волны к обычной ударной волне, которая уже рассматривалась в предыдущих задачах практикума. Основной проблемой является исследование перехода на границе двух сред (взрывчатое вещество-воздух), который может рассматриваться как распад произвольного разрыва, поскольку условия слева и справа от фронта больше не соответствуют стационарному распространению волны. Кроме того, при линейной и

сферической геометрии задачи принципиально различается дальнейшее развитие ударной волны, поскольку в сферически симметричном случае начинается интенсивное торможение волны из-за увеличения объема вовлекаемого в движение газа.

Распад произвольного разрыва на границе взрывчатое вещество- воздух во многом аналогичен ситуации, возникающей при разрыве диафрагмы в ударной трубе. На границе существует набор параметров слева и справа от нее – два разных давления, две разные скорости и две разные плотности. Детонационной волны больше не существует, поскольку все вещество сгорело. Существующая «ступенька» распадается на ударную волну, распространяющуюся в воздух и волну разрежения, которая распространяется в противоположном направлении. Если плотность среды, в которую выходит волна, меньше плотности продуктов детонации, распад происходит именно по такому принципу. Один расчет выполняется для увеличенной плотности воздуха с целью сравнения результатов распада произвольного разрыва в этом случае с обычным случаем малого давления перед фронтом (порядка одной атмосферы).

Далее в плоском случае происходит распространение ударной волны в полном соответствии с ранее рассмотренными закономерностями при анализе распространения ударной волны в ударной трубе.

Для конденсированных веществ основная проблема состоит в том, что продукты детонации оказываются очень сжатыми и для их описания требуется сложное уравнение состояния, показатель адиабаты не является в этом случае постоянной величиной.

Для случая сферической детонации распад произвольного разрыва мало отличается от плоского случая (так как происходит при фиксированном радиусе), однако дальнейшее распространение волны сопровождается ее ускоренным затуханием по сравнению с плоским случаем из-за постоянного увеличения площади фронта.

Интересной особенностью сферической детонации является существование аналитического решения в случае, когда скорость ударной волны достаточно велика (так называемая задача о сильном взрыве (Седов Л.И., 2004)). Поэтому после расчета будет проведено сравнение: полученные численные результаты для сферического случая могут быть сопоставлены с результатами теории сильного взрыва.

Порядок выполнения работы по заданию 4.

При выполнении данного расчета необходимо понимать, что первая стадия, до выхода детонационной волны в воздух, была подробно исследована в предыдущих заданиях. Теперь необходимо выбрать такое количество ВВ, которое обеспечит выход волны на стационарный режим распространения, и рассмотреть особенности формирования ударной волны и волны разрежения.

1. Расчет газовая смесь – воздух. Необходимо выбрать ту же газовую смесь, которая использовалась в расчетах в задании 1. Получение профилей давления сразу за фронтом позволяет найти амплитуды ударной волны и волны разрежения и сравнить результаты с теоретическим расчетом.

2. Повторение предыдущего расчета для конденсированного ВВ. Сравнение результатов с газовой детонацией.

3. Расчет распада разрыва для конденсированного ВВ при условии, что внешнее давление превышает давление в детонационной волне. Сравнение результатов по распаду произвольного разрыва.

4. Анализ возможностей теории сильного взрыва. Выбирается сферический заряд конденсированного ВВ. На временах, когда фронт ударной волны отойдет на расстояние порядка 10 радиусов заряда, делаются замеры профилей давления и осуществляется сравнение с теорией сильного взрыва.

Контрольные вопросы и задания

1. Ударная и детонационная волны: сходства и различия.
2. P-V диаграмма: диаграммы ударной и детонационной волн.
3. Что такое число Маха Жуге?

4. Что такое “химический пик”?
5. Что происходит со скоростью детонации при увеличении энерговыделения в среде?
6. Назовите основные различия распространения детонации в газовом и конденсированном ВВ.
7. Что происходит на границе ВВ-воздух при распространении детонационной волны?
8. Уравнение сохранения энергии для детонационной волны.
9. Критерии выбора шага сетки и расстановки датчиков при расчетах.

Литература

1. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Физматлит, 2004.
2. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика, часть 1. М., 1963.
3. Орленко Л. П. Физика взрыва и удара: Уч. пос. для вузов. М.: Физматлит, 2006.
4. Седов Л. И. Механика сплошной среды: в 2 тт. СПб.: Лань, 2004.
5. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. М.: Физматгиз, 1963.
6. Физика взрыва (под ред. Л. П. Орленко) в 2 тт. М.: Физматлит, 2004.