# УДК 629.7.02

# АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

К. К. Либерт, А. С. Акилов, М.В. Чернышов

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова

Детонационная волна — это совокупность ударной волны с последующей за ней зоной горения, в которой выделятся энергия на поддержания переднего ударного фронта, благодаря экзотермическим реакциям. Применение детонационного горения в реактивных и ракетных двигателях повышает термодинамический КПД процесса горения, в отличие от дефлаграционного горения при постоянном давлении. При этом схема двигателя для организации такого рода горения: в периодических детонационных волнах, бегущих вдоль камеры сгорания, применяются в пульсирующих детонационных двигателях. В таких двигателях реализуется термодинамический цикл, близкий к циклу Хамфри, а поэтому более экономичный, чем цикл Брайтона. Циклический рабочий процесс (рис. 1) в таких двигателях включает следующие стадии: a) заполнение камеры сгорания горючей смесью; b) зажигание смеси; c) ускорение пламени и переход горения в детонацию; d) сжигание смеси в бегущей детонационной волне; d) опустошение камеры сгорания от продуктов горения и детонации через сопло; f) заполнение новой топливно-воздушной смесью.

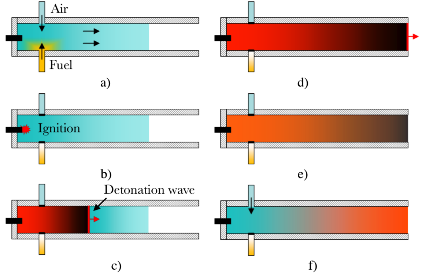


Рис.1 Последовательность смены фаз работы в ПуДД

Реальная структура детонационной волны внутри камеры сгорания является сложным комплексом нерешенных задач: качественные особенности и количественные характеристики механизма инициирования детонации, реализующегося в гладких или же профилированных трубах, в которых происходит быстрый переход из горения в детонацию с помощью лидирующей ударной волны; правильную реализацию механизмов химических реакций, от которых зависит структура переднего фронта детонационной волны, количество энергии, выделяемое при горении, идет на поддержание ударной волны и на нагрев расширяющихся продуктов воспламенения; стабилизация детонационной волны.

Надо напомнить, что сгорание происходит не мгновенно, оно занимает некоторое время τ. На рис. 2 представлена утрированная картина детонационной волны, где перед продуктами сгорания существует участок сжатой, но еще непрореагировавшей смеси, передняя граница которого – фронт ударного сжатия, изображенная плоскостью ВВ, перпендикулярно плоскости чертежа – движется со скоростью детонации, фронт воспламенения – поверхность ББ. Фронт сгорания может быть искажен из-за возмущений КЛК, которые могут возникнуть, если в одной из областей *кк* период индукции воспламенения возрастает, а в другой области *л* – сократится, например, вследствие неоднородности состава горючей смеси, поступающей в зону горения. В первые моменты в точках КК и Л после появления возмущения выполняется условие Жуге, иными словами, в точках КК и Л давление, как это показано на рис. 2 сечение *х-х,* резко скачком переходит от величины к значению . Перепад давления вдоль оси *х* устойчив. Но, вследствие возмущения, в направлении, перпендикулярном к движению волны, возникают неустойчивые перепады давления – разрывы или скачки (сечения *y-y* и ), проходящими через разные районы, охваченные возмущением КЛК. Ничто не мешает этим

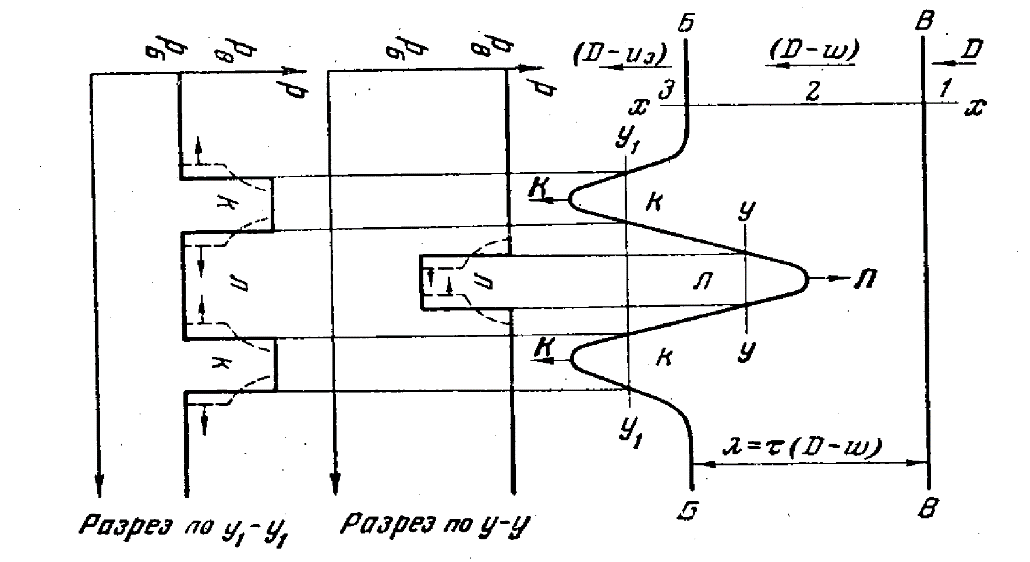
****скачкам распадаться. Поэтому, следует заметить, что газ в области начнет расширяться и зоны повышенного давления *кк* расширяются в стороны, в глубь их идут волны разрежения, а в области *y-y* сжиматься из-за того, что из областей *кк* газ заполняет зону *л*. Справа от области л, вследствие пересжатия детонационной волны, давление и температура несгоревшего газа растут, время реакции сокращается, а в области кк вследствие расширения температура падает, время реакции увеличивается. Таким образом, начальное возмущение КЛК увеличивается, (показано направление стрелок на рис. 2 ) , и в итоге плоский фронт воспламенения теряет устойчивость. Волны расширения и сжатия начинают распространяться в сторону плоскости ВВ, достигают ее и искажают фронт ударной волны. Подведя итоги, можно сделать вывод: условие потери устойчивости фронтом воспламенения является одновременно условием неустойчивости и фронта ударной волны, т.е. в итоге всего комплекса, образующего детонацию.

Рис 2. Схема утрированного малого возмущения (КЛК) и фронта воспламенения (ББ**)**

Если изначальное возмущение типа КЛК появляется на короткое время, то устойчивость зоны горения будет теряться лишь при достаточно быстром росте возмущения, иначе газ, несущий неоднородность успеет выйти из зоны горения, и начальное возмущение КЛК исчезнет. Надо помнить, что время возрастания возмущения до какого-то размера должно быть меньшим времени пребывания во фронте детонации. Каждое возмущение, достигшее фронта ударной волны, вызывает излом его передней границы. Изломы буду распространяться в разные стороны по поверхности фронта ударной волны, воспламеняя газ как на своем пути, так и в местах столкновения. В итоге фронт детонации приобретает вид пульсирующей щетки. При уменьшении диаметра трубы или по мере увеличения времени химической реакции, т.е. приближение смеси к ее пределу детонации по составу или давлению, по сечению трубы будут все меньше размещаться количество изломов, пока не останется лишь один – возникнет классическая одноголовая спиновая детонация.

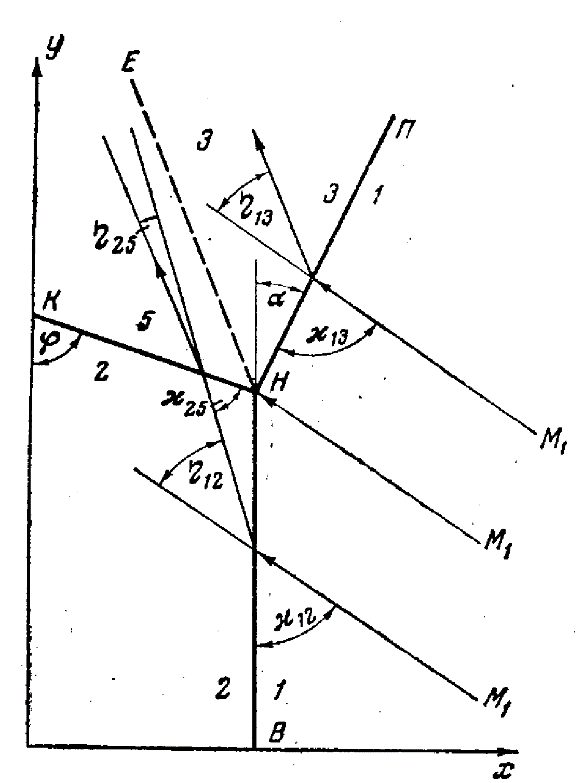
На рис. 3 представлена подробная схема излома переднего фронта. В точке Н пересекаются две плоские ударные волны НП и НВ, несгоревший газ движется под углом ϰ к ударному фронту НВ.

Для выполнения законов сохранения в окрестности точки Н, за фронтом пересекающихся волн появляется еще одна ударная волна НК и тангенциальный разрыв НЕ (рис. 4), по обе стороны которого давление одинаково, но терпят разрыв тангенциальные скорости. Плотность и температура по обе стороны этого разрыва различны. Такая ударно-волновая структура называется тройной ударной (маховской) конфигурацией. В нашем случае, такая структура ударных волн перемещается вдоль оси трубы (ось *х*) со скоростью ударного фронта детонации D и одновременно движется по его поверхности – по оси *y* поперек оси трубы. Стрелками указано направление исходного газа, набегающего на фронт НВ под углом , со скоростью:

 (1)

или числом Маха

 (2)



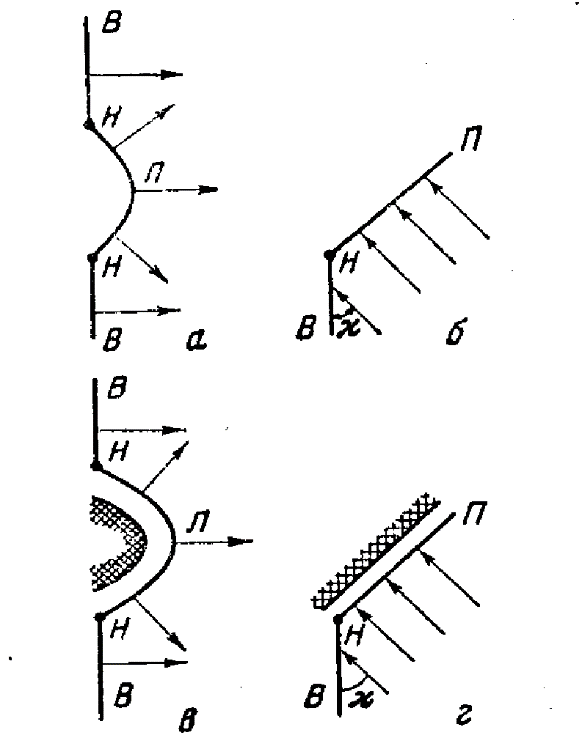


Рис. 4. Тройная ударная конфигурация при пульсирующей детонации

Рис. 3. Схема образования изломов в переднем ударном фронте детонации: а, б – без выделения химической энергии непосредственно за изломом; в, г – с возникновением химической реакции непосредственно позади излома

Углы на рис. 4 это отклонение потока газа за фронтом сжатия от первоначального направления, за исключением, если поток газа направлен перпендикулярно ударному фронту НВ. Прохождение газа через фронт косой ударной волны НП сопровождается изменением нормальной составляющей скорости (она уменьшается вследствие сжатия), тангенциальная составляющая скорости при этом не изменяется. Чем сильнее сжатие, тем больше угол преломления, тем поток сильнее прижимается к плоскости фронта.

С увеличением угла отклонения η (рис. 4) возможности маневрирования углом набегающего потока уменьшаются. Нулевой угол отвечает нормальному положению фронта по отношению к потоку () и это максимальный прирост давления.

Самая благоприятная зона воспламенения для газа — это зона 3 на рис. 4, где достигается наиболее высокая температура. В зоне 3 газ переходит от начального состояние в конечное при однократном сжатии. Таким образом, косая ударная волна может перейти в косую детонацию для пульсирующей детонации в условиях, когда она близка к спиновой.

Однако такая косая детонация может столкнуться с соседней, точно такой же тройной конфигурации (рис. 5). И в результате повышается давление и температура в районе отражения, которое мы называем двойным, так как при встрече двух конфигураций отражаются друг от друга как косые волны НП, так и волны НК. На рис. 6 показана ударно-волновая структура при столкновении двух конфигураций.

Температура в зоне 8 (рис. 6) самая высокая, нежели за косой ударной волной НП (рис. 4). Двойное отражение создает еще более благоприятные условия для воспламенения газа, правда, на сравнительно небольших участках фронта детонационной волны.

В результате, всего выше перечисленного, выходит, что неустойчивость плоской детонации, вызывает искривления ударного фронта, создает в косых ударных волнах – тройных ударных конфигурациях – более благоприятные условия воспламенения газа по сравнению с плоским фронтом. Двойное отражение тройных конфигураций друг от друга приводит к появлению еще более высоких

температур и лучших условий для зажигания газа. Неустойчивость плоской волны увеличивает живучесть детонации, вызывая к жизни более устойчивые ее виды.

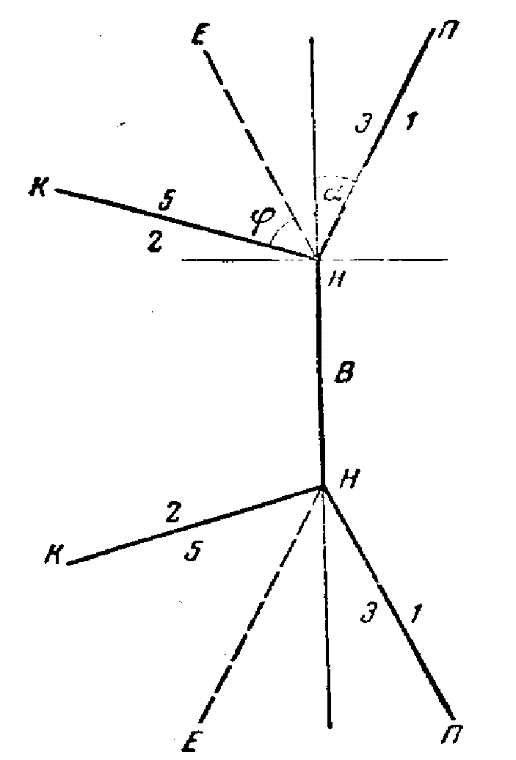
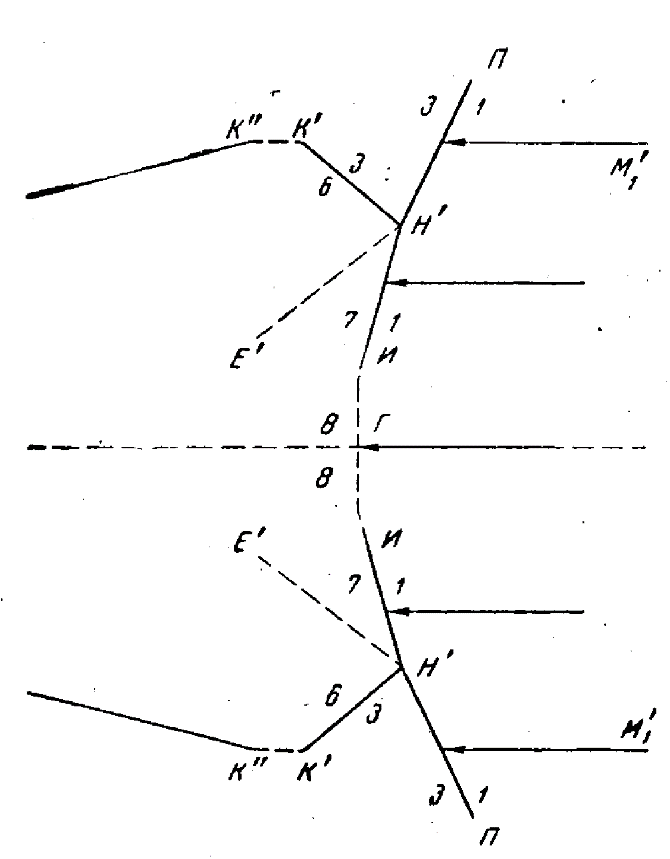


Рис. 5. Две тройные конфигурации перед моментом их столкновения

Рис. 6. Результат столкновения двух волн НП

Такая картина течения происходит в гладких трубах, в которых возникновение детонации происходит на большом расстоянии от инициирования. Чтобы сократить время и расстояния перехода от горения к детонации (ПГД) необходимо использовать шероховатые или профилированные трубы (спираль Щелкина, обратные уступы, сужающиеся и расширяющиеся каналы). В результате, всего выше перечисленного, выходит, что неустойчивость плоской детонации, вызывает искривления ударного фронта, создает в косых ударных волнах – тройных ударных конфигурациях – более благоприятные условия воспламенения газа по сравнению с плоским фронтом. Двойное отражение тройных конфигураций друг от друга приводит к появлению еще более высоких температур и лучших условий для зажигания газа. Неустойчивость плоской волны увеличивает живучесть детонации, вызывая к жизни более устойчивые ее виды.

В следствие турбулизации потока происходит изменение профиля пламени и увеличение его поверхности, что приводит к интенсификации процессов диффузии и теплопроводности, которыми обуславливается процесс распространения пламени. Это классический метод перехода горения в детонацию, но зато он требует минимальных затрат энергии на начальное инициирование горения и влияет на значительное сокращение расстояния и времени для ПГД. Специальные профили стенок трубы дают такую возможность, а также обеспечивают управлением локальных областей газодинамических фокусировок потока (тройные ударные конфигурации) таким образом, чтобы обеспечить условия необходимое, во-первых, для самовоспламенения стехиометрической топливно-воздушной смеси, а во-вторых для формирования детонационной волны.

На рис. 7 представлена геометрия трубы с профилированными стенками. В ней моделировалась ударная волна с числом Маха М=3. Труба заполнена идеальным газом и была поделена на две области: область высокого давления (ОВД) длиной 0,07м и область низкого давления (ОНД). Газодинамические параметры газа в ОВД и ОНД представлены в Таб. №1 и Таб. №2 соответственно.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| М=3 | р2, атм | Т2, К | v2, м/c | М2 |
| ОВД | 10,3 | 803,677 | 771,53 | 1,36 |

Таблица 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| М=3 | р1, атм | Т1, К | v1, м/с |
| ОНД | 1 | 300 | 0 |

Таблица №2

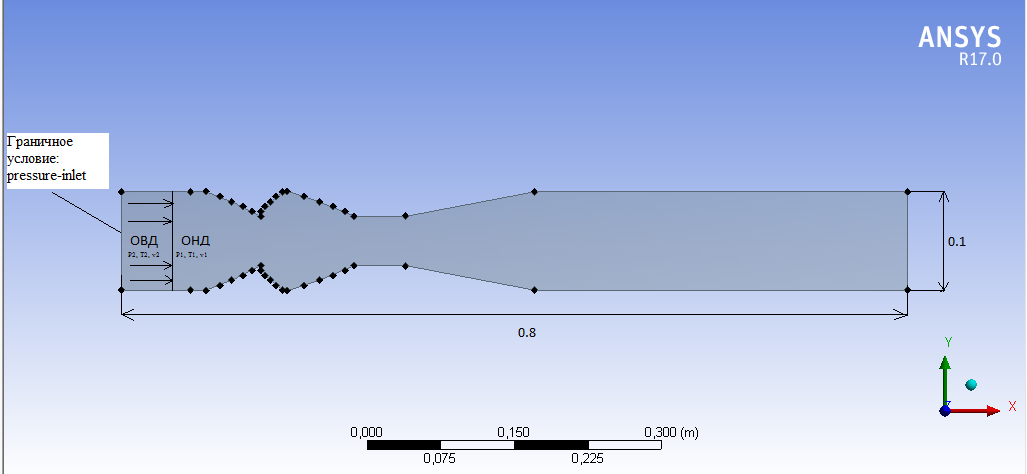
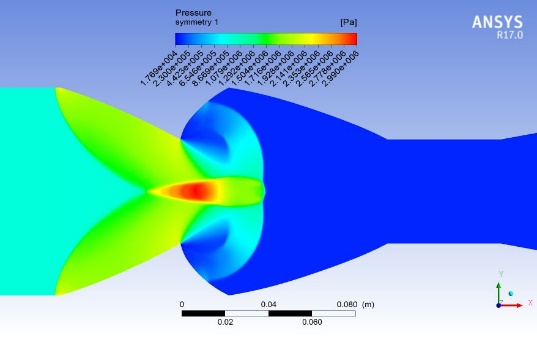


Рис. 7. Геометрия трубы с профилированными стенкам (все размеры указаны в метрах)

Профиль трубы, составлен из параболических и прямолинейных участков. Длина узкой части диаметром 0,05 м после участка трубы с параболическими профилем составляет 0,052 м, угол раствора конического расширения – 20 градусов. Расчет проходил на структурированной ортогональной сетки, размер ячейки которой, составлял 0,001 м, всего было 75000 эелементов. Для задание граничного условия pressure-inlet, необходимо вычислить полное давление и температуру по изоэнтропическим формулам:

 (3)

 (4)

В результате численного расчета, мы получаем картину взаимодействия и изменения ударно-волновых структур с профилированными стенками трубы. На рис. 8 мы видим, как плоская ударная волна, образовавшаяся на границе ОВД и ОНД, набегает на первую параболическую поверхность. В результате взаимодействия ударной волны с искривлённой поверхностью трубы, возникает та самая тройная конфигурация, которая необходима для воспламенения смеси. После образования ножки Маха, происходит усиление лидирующей ударной волны вблизи оси симметрии трубы, а именно образование “пузыря” с повышенными термодинамическими параметрами, т.е. у оси симметрии трубы возникает детонация.

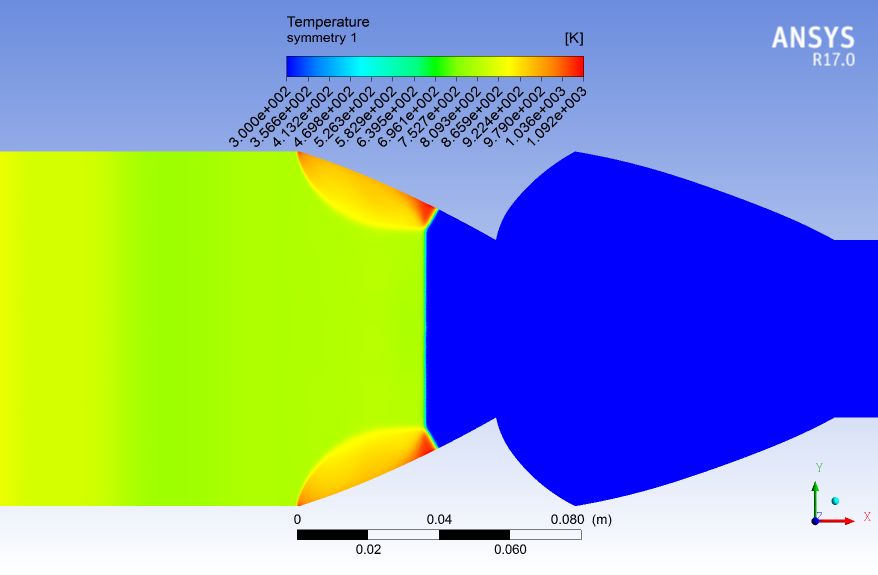


Рис. 8. Слева, маховское отражение ударной волны от первого параболического изгиба профиля трубы в момент времени 49 мкс, отсчитываемого от начало возникновения лидирующей ударной волны и справа, образование детонационного пузыря в момент времени 99,8 мкс: (а) поле температур, (б) поле давления

(а)

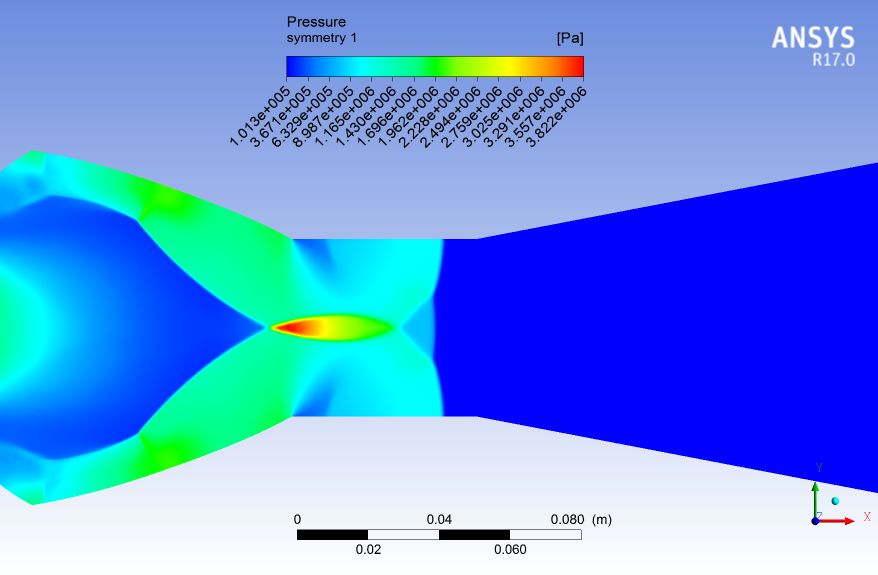
(б)

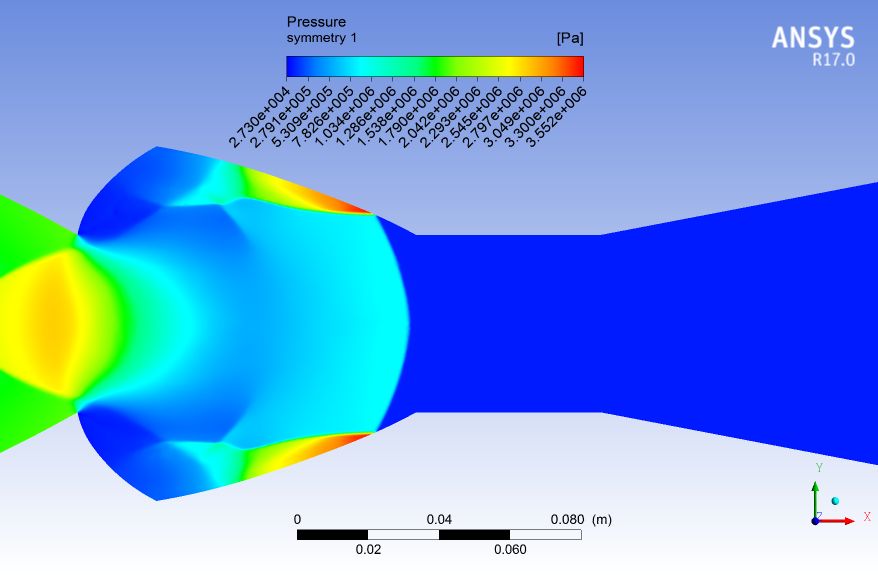
Но возможен случай, когда детонация в области первой фокусировки не возникает, поэтому приходиться использоваться второй профилированный элемент, на который приходит не плоская ударная волна, а волна с искривлённым фронтом. Поэтому для фокусировки потока нужно, чтобы профилировка второго элемента была “круче”, но при этом он должен быть еще “пологим”, так как отраженные от второго элемента ударные волны должны фокусироваться в непосредственной близости от фронта лидирующей ударной волны в зоне непрореагировавшей смеси. Соблюдая две эти стороны можно достичь инициирования детонации в близи оси трубы. В данном случае, при инициировании ударной волны с Махом М=3, достаточно одного профилированного элемента. В дальнейшем, как показано на рис. 9 а, во втором профилированном элементе происходит расширение газа, детонационной области вблизи оси трубы не образуется, а возникают зоны повышенного давления только по радиальным направлениям.

Важным элементом конструкции является участок трубы вдвое меньше диаметра по сравнению со входным сечением. Узкий участок необходим для восстановления детонации за счет формирования мощных поперечных волн, которые в свою очередь и определяют жизнеспособность детонационной волны (см. рис. 9 б). На рис. 9 б видно образование детонационной области.

Рис. 9. (а) – возникновение зон повышенного давления во втором профилированном элементе в момент времени 148,18 мкс, отсчитываемого от начало возникновения лидирующей ударной волны, поле давления; (б) – образование детонационного пузыря в узкой части трубы в момент времени 193,14 мкс, отсчитываемого от начало возникновения лидирующей ударной волны, поле давления

(б)



****

(а)

Для обеспечения перепуска пересжатой детонации из узкой трубы в широкую надо учитывать некоторые критические величины, а именно длину узкой части и угол раствора, которые задают интенсивность инициирующей ударной волны.

На рис. 10 представлена уже снова сформировавшееся ударная волна, выходящая в выходную часть трубы. Это свидетельствует о реализации самоподдерживающейся детонационной волны.

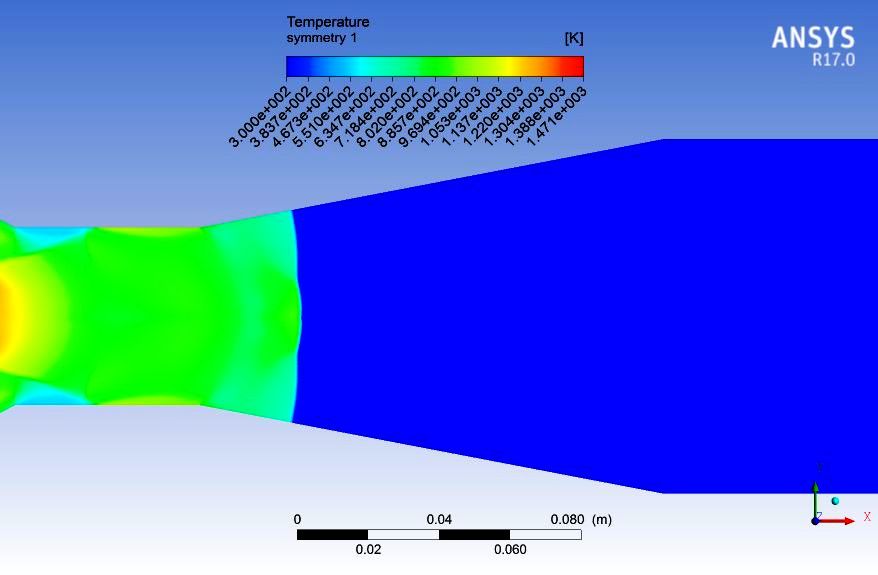


Рис. 10. Восстановление ударной волны в расширяющейся части трубы в момент времени 229,75 мкс, отсчитываемого от начало возникновения лидирующей ударной волны, поле температур

**Библиографический список**

1. Дубровксий А. В., Медведев С. Н., Фролов С. М., Шамшин И. О. Математическое

моделирование перехода ударной волны в детонацию в трубе с профилированным телом. Горение и взрыв: выпуск 4. ИХФ РАН г. Москва, Россия.

1. Нечаев Ю.Н., Тарасов А.И., Полев А.С., Мохов А.А. Области возможного при-

менения пульсирующих детонационных двигателей // Общероссийский науч.-

техн.журнал ''Полет’’ 2007.

1. Семёнов И.В., Уткин П.С., Марков В.В. Инициирование детонации в профилиро-

ванных трубах // Тезисы докладов Всероссийской конференции Проблемы меха-

ники сплошных сред и физики взрыва, посвящённой 50-летию Института гидро-

динамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2007 – С. 151.

1. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения// Академия наук СССР институт химической физики. Москва 1963 г.