

УДК 534.222.2

Е. С. Прохоров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: prokh@hydro.nsc.ru

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЕРЕСЖАТОЙ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В СУЖАЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

Представлена простая квазиодномерная модель для описания распространения газовой детонации в канале с переменным поперечным сечением. Эта модель применима для приближенных аналитических расчетов степени пересжатия детонационной волны при переходе детонации из широкой трубы в узкую и оценки значений газодинамических параметров на детонационном фронте.

Ключевые слова: детонационные волны, степень пересжатия, продукты детонации, изотермическая среда, моделирование.

Решение многих теоретических и прикладных задач в области физики горения и взрыва приобретают большое значение в связи с необходимостью разработки и создания ряда устройств новой техники, функционирование которых связано с детонационным сжиганием взрывчатых газовых смесей. Подобные устройства могут быть использованы для создания тяги в двигателях, силового или разрушающего воздействия на объекты, быстрого сжигания топлива, для разгона и нагрева конденсированных частиц и т. п. [1; 2].

С целью расширения диапазона достижимых параметров продуктов детонационного сжигания (продуктов детонации или сокращенно ПД) весьма перспективны исследования пересжатых детонационных волн (ДВ), у которых скорость фронта D и давление ПД больше, чем у стационарной (установившейся) детонации Чепмена – Жуге [3; 4]. Степень пересжатия ДВ α определяется следующим соотношением:

$$\alpha = D / D_{CJ}. \quad (1)$$

Здесь и далее нижний индекс «CJ» используется для обозначения параметров детонации Чепмена – Жуге. Как показывают равновесные расчеты [5], уже небольшое увеличение скорости ДВ приводит к резкому росту таких характеристик ПД, как дав-

ление p , плотность ρ , массовая скорость u . Хотя рост температуры ПД и демпфируется процессами диссоциации, тем не менее он также заметен. Поэтому пересжатые ДВ могут служить источником импульсных потоков ПД с параметрами, заметно превышающими те, которые можно получить при детонации Чепмена – Жуге, чем и определяется область их возможных применений в приложениях. Например, для нанесения защитных и износостойких порошковых покрытий на различные инструментальные и конструкционные материалы газодетонационным методом (детонационное напыление) [6].

Известно [3], что в пересжатом режиме нестационарная волна разрежения, возникающая вследствие расширения ПД, может догнать и ослабить ДВ до самоподдерживающегося режима Чепмена – Жуге. Поэтому длительное существование пересжатых ДВ возможно лишь при наличии поршня, движущегося сзади и сжимающего ПД.

Наиболее просто в практическом исполнении создавать пересжатые ДВ при переходе газовой детонации из широкой трубы в узкую. В этом случае сжатые при отражении от стенок трубы ПД, затекая в узкую часть канала, сами действуют как поршень на ДВ. Экспериментальные исследования пересжатых ДВ, сформированных таким

способом, выполнены в [7–10]. Построению математических моделей для адекватного описания этого явления и численному исследованию с их помощью влияния геометрии сужающегося канала на детонационный процесс посвящены работы [11–13].

Так, в [11] в рамках канального одномерного приближения численно исследовано нестационарное равновесное течение за пересжатой ДВ, сформированной при переходе газовой детонации из широкой трубы в узкую через конически сужающийся патрубок. Учитывая неоднородность реального процесса, в [12] путем сравнения расчетов с экспериментальными данными определены границы применимости такого приближения. При двумерной осесимметричной постановке этой задачи в [13] удалось более детально проанализировать механизм формирования пересжатой ДВ в узкой части трубы. Отмечено, что результаты квазиодномерного расчета [11] по затуханию пересжатой ДВ в узкой трубе для малых углов конического сужения ϕ (не более 20° на сторону) вполне удовлетворительно коррелируют с усредненными расчетными данными двумерной модели.

В данной работе предложена более простая по сравнению с [11] квазиодномерная модель для описания распространения ДВ в канале с переменным поперечным сечением. Эта модель применима для приближенных аналитических расчетов степени пересжатия ДВ при переходе детонации из широкой трубы в узкую и оценки газодинамических параметров на детонационном фронте в зависимости от α .

Для упрощенного описания ДВ можно использовать следующий подход. Так, на практике часто встречается ситуация, когда толщина фронта пренебрежимо мала по сравнению с характерным линейным масштабом всего газодинамического течения (например, диаметром трубы, в которой распространяется детонация). В этом случае фронт ДВ можно рассматривать как скачок уплотнения с мгновенным выделением тепла, на котором, в частности, должны выполняться законы сохранения массы, импульса и энергии (соотношения на сильном разрыве [14]). Из анализа равновесных расчетов параметров детонации [5] следует, что для интенсивно взрывающихся газовых смесей с температурой продуктов химической ре-

акции порядка $2500\div 4000$ К показатель равновесной адиабаты близок к единице, т. е. ПД представляют почти изотермическую среду, когда можно приближенно считать, что $p/\rho = \text{const}$.

Для этой модели справедливы следующие соотношения на фронте ДВ:

$$\begin{aligned} \rho_* (D - u_*) &= \rho_0 D, \\ p_* + \rho_* (D - u_*)^2 &= p_0 + \rho_0 D^2, \\ p_* / \rho_* &= c_{CJ}^2 = \text{const}, \end{aligned} \quad (2)$$

где c_{CJ} – равновесная скорость звука в ПД; индексами «0» и «*» обозначены значения газодинамических величин в исходном состоянии (перед фронтом) и на фронте ДВ соответственно. Если уравнения (2) дополнить условием Чепмена – Жуге относительно равновесной скорости звука [15]

$$D_{CJ} = u_{CJ} + c_{CJ}, \quad (3)$$

тогда для детонации Чепмена – Жуге можно оценить значения параметров ПД на фронте.

Обычно для ДВ $p_* \gg p_0$, так что начальным давлением газовой смеси можно пренебречь. Тогда, решая систему уравнений (2)–(3), получаем

$$\begin{aligned} u_{CJ} &= c_{CJ} = D_{CJ} / 2, \\ \rho_{CJ} &= 2\rho_0, \quad p_{CJ} = 2\rho_0 c_{CJ}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Погрешность таких оценок по сравнению с точными равновесными расчетами [5] не хуже 15 %.

Используя определение (1) для α , из соотношений (2) находим зависимости p_* , ρ_* , u_* на фронте ДВ от степени пересжатия:

$$\begin{aligned} p_* / p_{CJ} &= \rho_* / \rho_{CJ} = \alpha \left(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1} \right), \\ u_* / u_{CJ} &= \alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Интересно отметить, что для обезразмеренных параметров детонации погрешность формул (5) незначительна (около 3 %) по сравнению с расчетами [5].

Рассмотрим задачу о переходе газовой детонации из широкой трубы (с площадью поперечного сечения S_0) в узкую (с площадью поперечного сечения S_1) через сужающийся патрубок (канал с изменяющейся площадью поперечного сечения $S_1 \leq S \leq S_0$, где $S = S(x)$ – некоторая убывающая функция от координаты x). Примерная схема такой трубы представлена на рис. 1.

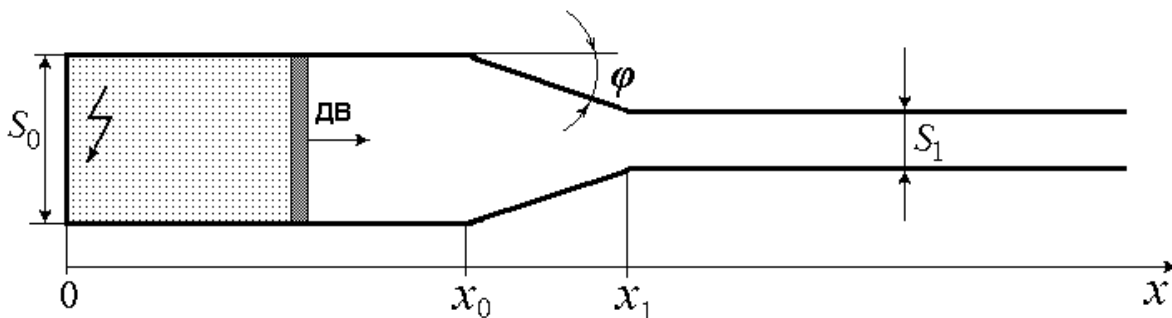


Рис. 1. Схема трубы с переменным поперечным сечением: ϕ – угол сужения трубы

Будем использовать следующие дополнительные предположения (по аналогии с [11]).

1. Параметры течения ПД по ширине канала постоянны. В рамках квазиодномерного приближения под шириной канала понимается гидравлический диаметр (для круглой трубы совпадает с обычным) $d = 4S/\chi$, где χ – периметр поперечного сечения канала [16].

2. Труба – достаточно «широкая» [17], когда отличие параметров на фронте ДВ от параметров идеальной (без потерь на трение и теплоотвод) детонации пренебрежимо мало. Поэтому считаем скорость $D_{СД}$ заданной, например, из точных равновесных расчетов [5].

Пусть в широкой части трубы ($x < x_0$) самоподдерживающаяся ДВ распространяется по смеси со скоростью $D_{СД}$. После входа в область сужения трубы ($x_0 < x < x_1$) детонация усиливается, возрастает ее степень пересжатия α , которая достигает своего максимального значения α_{\max} при входе в узкую часть трубы ($x = x_1$). Для приближенного расчета α_{\max} можно воспользоваться (например, как в [18]) методом Уизема [19], разработанным для расчета скорости ударных волн в каналах с изменяющимся поперечным сечением. Метод основан на так называемом «характеристическом правиле»: предположение о близости скоростей фронта волны и догоняющей его c_+ -характеристики. При таком описании не учитывается обратное действие на фронт возмущенного состояния ПД, что позволяет получить аналитическую зависимость между относительным изменением площади поперечного

сечения канала S_0/S_1 и максимальной степени пересжатия ДВ α_{\max} .

Для квазиодномерных течений газа в трубе с переменным поперечным сечением вдоль c_+ -характеристики (линии

$$dx/dt = u + c,$$

где t – время) должно выполняться следующее дифференциальное уравнение [20]:

$$du + \frac{dp}{\rho c} = -\frac{uc}{u+c} d(\ln S). \quad (6)$$

При малых степенях пересжатия разница наклонов траекторий движений фронта ДВ и догоняющей его c_+ -характеристики мала ($u_* + c_* - D \approx 0$). Тогда можно считать, что (6) выполняется и вдоль траектории фронта ДВ.

Подставляя в (6) соотношения (4) и (5), получим дифференциальное уравнение, устанавливающее связь между степенью пересжатия α и площадью поперечного сечения $S = S(x)$:

$$\left(\sqrt{\frac{\alpha+1}{\alpha-1}} + 1 \right) \cdot (1 + 1/\alpha) \cdot d\alpha = -d(\ln S).$$

Проинтегрируем это уравнение в области сужения трубы, когда площадь поперечного сечения изменяется от S_0 до S_1 , а степень пересжатия от 1 до α_{\max} . В результате получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & (\alpha_{\max} - 1) + \sqrt{\alpha_{\max}^2 - 1} + \\ & + \ln \left[\alpha_{\max} \left(\alpha_{\max} + \sqrt{\alpha_{\max}^2 - 1} \right)^2 \right] + \\ & + \arccos(1/\alpha_{\max}) = \ln(S_0/S_1), \end{aligned} \quad (7)$$

которое устанавливает приближенную аналитическую зависимость максимальной

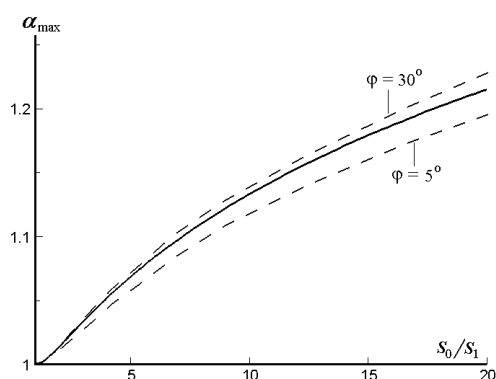


Рис. 2. Зависимость максимальной степени пересжатия ДВ от отношения площадей поперечного сечения широкой и узкой частей трубы: сплошная линия — уравнение (7), пунктирные линии — результаты расчетов по модели [11]

степени пересжатия ДВ от отношения площадей S_0/S_1 (рис. 2).

Проведем сопоставление зависимости (7) с результатами численных расчетов по квазиодномерной нестационарной модели [11], которая, по крайней мере для диапазона углов сужения трубы φ (см. рис. 1) от 5 до 30° и отношении площадей $S_0/S_1 \leq 16$ (как показано в работе [12]), хорошо согласуется с экспериментальными данными. Соответствующие расчетные кривые [11] изображены на рис. 2. Видно, что (7) вполне удовлетворительно аппроксимирует результаты расчетов по модели [11] для максимальной степени пересжатия ДВ (отклонение не превышает 3 %) и не выходит за границы ее применимости (находится между пунктирными линиями) относительно φ . Поэтому для приближенных расчетов α_{\max} можно использовать уравнение (7).

Если в (7) вместо S_1 подставить функцию $S = S(x)$, то получим зависимость степени пересжатия α от текущего положения фронта ДВ (координаты x) в области сужения трубы. Используя эту зависимость $\alpha = \alpha(x)$ совместно с формулами (5), можно оценить повышение давления p^* , плотности ρ^* и массовой скорости u^* ПД на волновом фронте по мере его распространения в трубе на участке $x_0 < x < x_1$ (см. рис. 1).

Таким образом, в работе сформулирована простая модель, позволяющая вполне

адекватно описывать изменение скорости фронта и газодинамических параметров ДВ, распространяющейся в сужающемся канале по взрывчатой газовой смеси.

Список литературы

1. Вопросы использования детонации в технологических процессах / Под ред. В. В. Митрофанова. Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1986. 142 с.
2. Импульсные детонационные двигатели / Под ред. С. М. Фролова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2000. 592 с.
3. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1940. Т. 10, вып. 5. С. 542–568.
4. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Чельшев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
5. Николаев Ю. А., Топчийн М. Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 3. С. 393–404.
6. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. Новые возможности детонационного напыления // Тр. Пятой международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». Новосибирск, 2000. С. 155.
7. Айвазов Б. В., Зельдович Я. Б. Образование пересжатой детонационной волны в сужающейся трубке // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1947. Т. 17, вып. 10. С. 889–900.
8. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Топчийн М. Е. Исследование пересжатых детонационных волн // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 119–123.
9. Gavrilenko T. P., Prokhorov E. S. Overdriven Gaseous Detonation // Progress in Astronautics and Aeronautics; Vol. 87: Shock Waves, Explosions and Detonations / Eds. J. R. Bowen et al. 1983. P. 244–250.
10. Гавриленко Т. П., Григорьев В. В., Троцюк А. В., Ульяницкий В. Ю. Разгон частиц пересжатой детонационной волной // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 6. С. 104–109.
11. Ждан С. А., Прохоров Е. С. Квазиодномерный расчет детонации в канале пере-

менного сечения // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 5. С. 96–100.

12. Прохоров Е. С. К расчету распространения детонационных волн в сужающемся канале // Динамика сплошной среды. 1988. Вып. 88. С. 109–115.

13. Ждан С. А., Прохоров Е. С. Формирование и распространение пересжатых газодетонационных волн в конически сужающихся каналах // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 92–100.

14. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

15. Митрофанов В. В. Детонация однородных и гетерогенных систем. Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 2003. 200 с.

16. Гинзбург И. П. Прикладная гидрогазодинамика. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1958. 339 с.

17. Николаев Ю. А. Теория детонации в широких трубах // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 3. С. 142–149.

18. Teipel I. Detonation Waves in Pipes with Variable Cross-Section // Acta Mechanica. 1983. Vol. 47. P. 185–191.

19. Whitham G. B. Linear and Nonlinear Waves. N. Y.: Wiley, 1974. 559 p.

20. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971. 804 с.

Материал поступил в редколлегию 28.12.2010

E. S. Prokhorov

APPROXIMATE CALCULATION OF OVERDRIVEN GASEOUS DETONATION IN CONVERGENT CHANNELS

A simple quasi-one-dimensional model is presented to describe the propagation of gaseous detonation in a channel with variable cross-section. This model is applicable for the approximate analytical calculations of the degree overdrive of detonation wave in the transition of detonation from a broad to a narrow tube, and estimating the values of gasdynamic parameters at the detonation front.

Keywords: detonation waves, degree of overdrive, detonation products, isothermal environment, modeling.