

физика быстропротекающих процессов

4 курс 7 семестр

лектор – доцент., к.т.н.

Козлов Анатолий Сергеевич

Одномерные изоэнтропные движения газа

В том случае, если недостаточно сведений об изучаемом процессе, прибегают к понятию о политропическом изменении состояния среды

$$P = A \cdot \rho^n \text{ или } P \cdot V^n = \text{const} , (5.1)$$

где P - давление в среде;

ρ - плотность среды;

$V = \frac{1}{\rho}$ - удельный объем;

n - показатель политропы.

Величина работы, совершаемая газом, будет зависеть от характера процесса и показателя политропы, величина которого изменяется в интервале $0 \leq n \leq +\infty$. Если величина показателя степени будет принимать некоторые дискретные значения, $n = 1; 2; k; +\infty$, то получим частные случаи - хорошо известные процессы (таблица 5.1)

Характеристики процессов в зависимости от показателя политропы. Таблица 5.1

величина показателя политропы n	характер изменения термодинамических величин				характеристика процесса
	dQ	dP	dT	$d\rho^*$	
0	<0	0	<0	>0	изобарный
1	<0	>0	0	>0	изотермический
k^{***}	0	>0	>0	>0	адиабатический
$+\infty$	>0	>0	>0	0	изохорный

* В случае расширения газа, т.е. $d\rho < 0$ или $dV > 0$, все знаки следует изменить на противоположные.

** $k = \frac{C_p}{C_v}$, где C_p и C_v - теплоемкость среды, при постоянном давлении и объеме, соответственно.

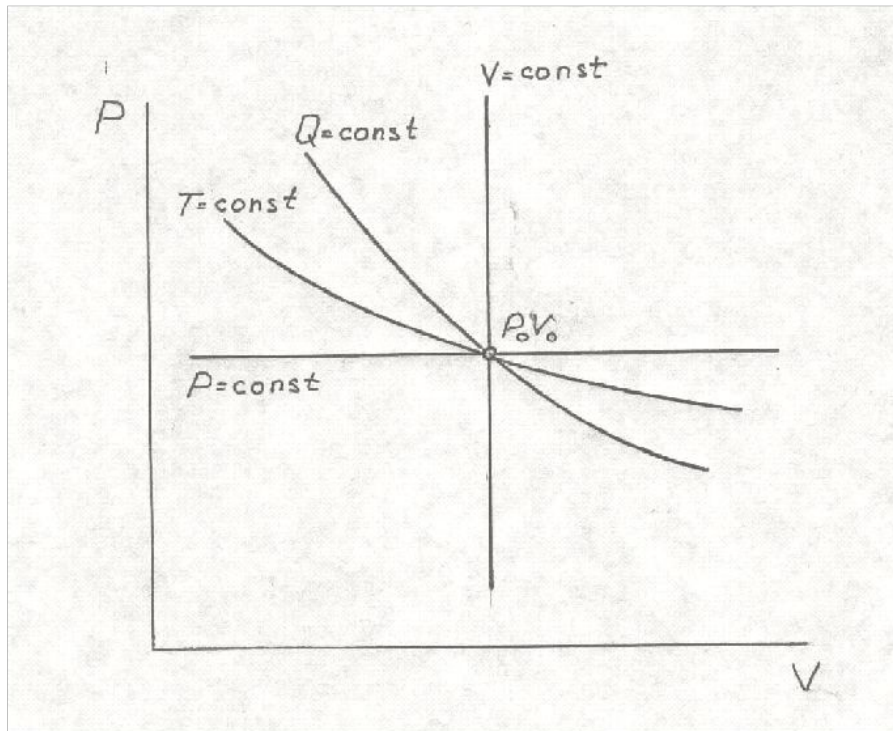


Рис. 5.1 Изохора, изотерма, адиабата и изобара в координатах $P=P(V)$

На рисунке 5.1 в координатах $P=P(V)$ изображены изохора, изотерма, адиабата, изобара.

Процессы взрывчатого превращения - процессы быстропротекающие, происходящие без теплообмена с окружающей средой. Поэтому из всех частных случаев может быть применен для описания интересующих процессов только адиабатический. Если в обратном адиабатическом процессе энтропия $S = \text{const}$, то такой процесс называется изоэнтропийный (изоэнтропный), с уравнением состояния

$$PV^k = \text{const} \quad (5.2)$$

В случае одномерных плоских движений среды основные уравнения газодинамики могут быть представлены в виде:

$$\frac{\partial \ln(\rho)}{\partial t} + u \frac{\partial \ln(\rho)}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (5.3)$$

где x и t - координата и время;

u - скорость среды.

Из (5.2) следует (без вывода)

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{S=\text{CONST}} = V^2 \left(- \frac{\partial P}{\partial V} \right) = kPV = kRT = C^2, \quad (5.4)$$

где R - газовая постоянная;

C - скорость звука в среде, определяемая ее изэнтропийной сжимаемостью.

В соответствии с (5.4) величина скорости звука пропорциональна углу наклона касательной к оси абсцисс в точке изэнтропы, соответствующей состоянию среды (рис 5.2).

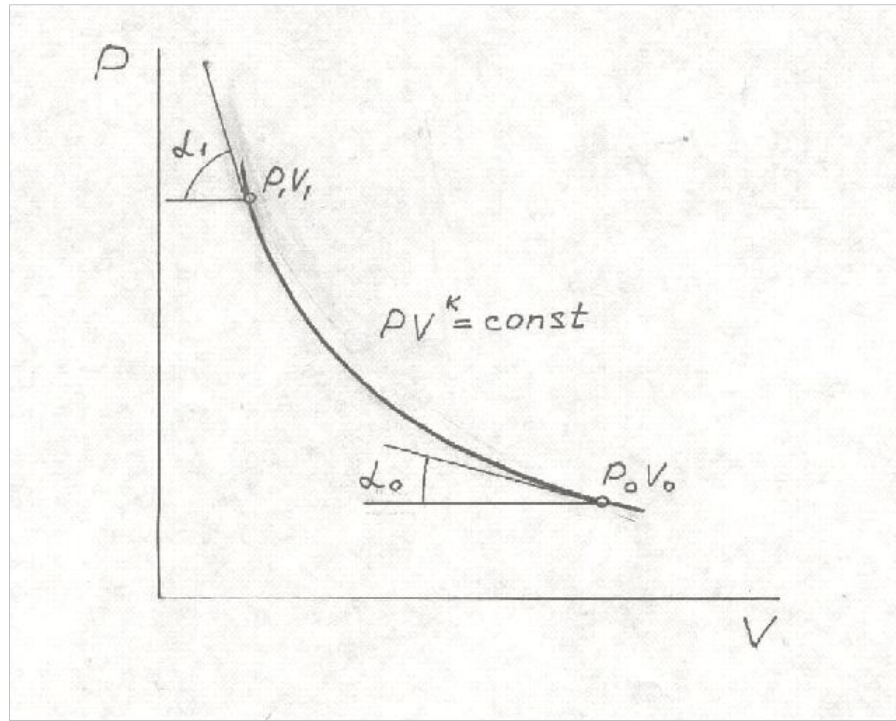


Рис. 5.2 Изменение величины скорости звука с изменением параметров среды

Путем преобразований системы (5.3) можно получить уравнение, определяющее одномерное изэнтропное движение газа

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(u \pm \frac{2}{k-1} c \right) + (u \pm c) \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(u \pm \frac{2}{k-1} c \right) = 0, \quad (5.5)$$

Особые решения (5.5) можно записать

$$x = (u \pm c)t + F(u); \quad u \pm \frac{2}{k-1} c = \text{const}$$

где: $F(u)$ - произвольная функция.

Для простых волн (возмущений) скорость их распространения будет определяться соотношением :

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_+ = u + c; \quad \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_- = u - c, \quad (5.7)$$

которые носят названия C_+ и C_- характеристик (рис 5.3).

Наклон характеристик к оси абсцисс определяется состоянием газа и, следовательно, величиной скорости звука.

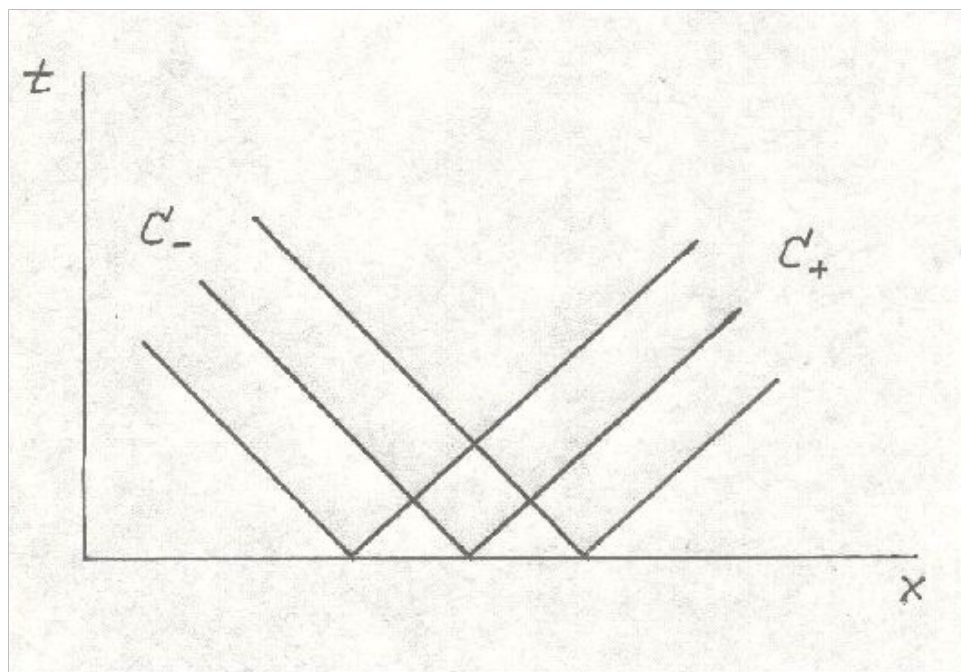


Рис. 5.3 Сетка семейства характеристик

Пусть в трубе, закрытой с одного конца, находится газ, ограниченный с другого конца поршнем (рис 5.4) При движении поршня газ, прилегающий к нему, устремляется за ним. Последующие слои газа будут вовлекаться в движение за счет проникновения возмущения (C_0) - “головы” волны разгрузки (разряжения). Положим, что движение поршня происходит с ускорением.

Если при $t \geq t_1$ скорость поршня будет больше $2 \frac{C_0}{k-1}$, то скорость газа достигает своего максимального значения

$$U \rightarrow |U_{\max}| = 2 \frac{C_0}{k-1}$$

и между газом и поршнем возникает вакуум. На рис 5.5 изображены эпюры изменения давления и скорости газа, при воздействии волны разряжения (ВР).

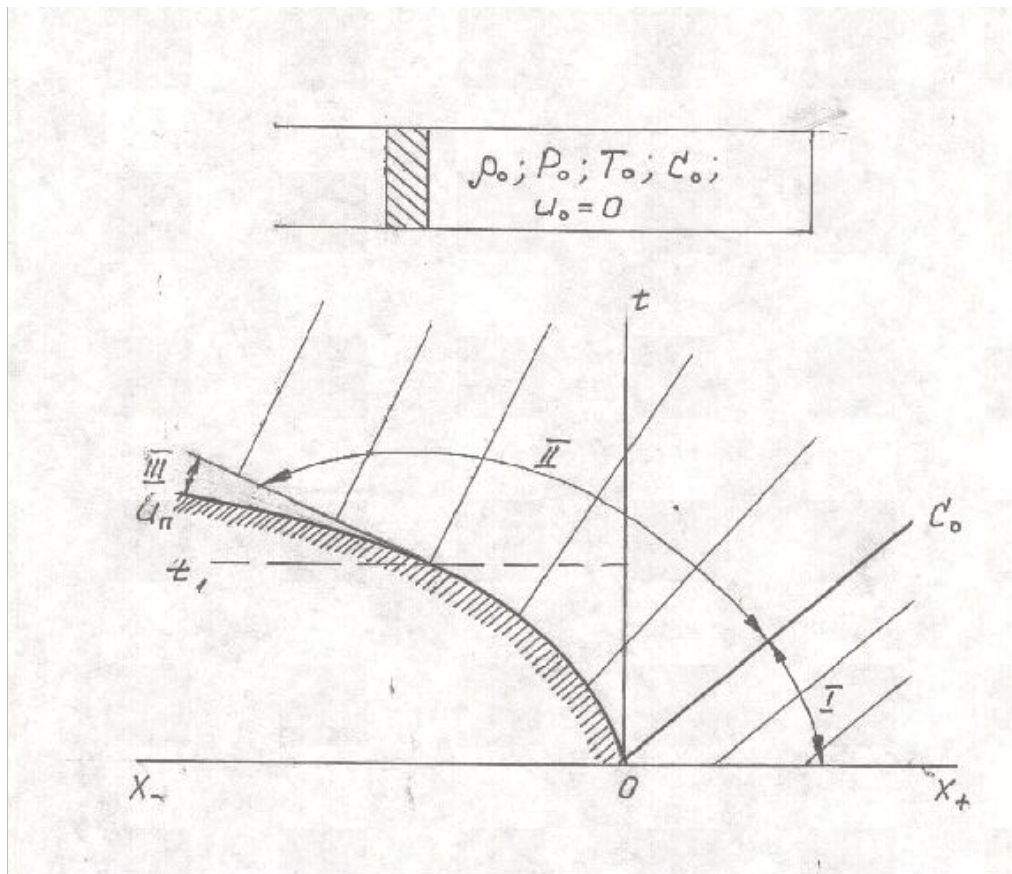


Рис. 5.4 t, x - диаграмма образования волны разрежения

I - область покоя

II - область воздействия волны разрежения

III - область вакуума

c_0 - "голова" волны разгрузки.

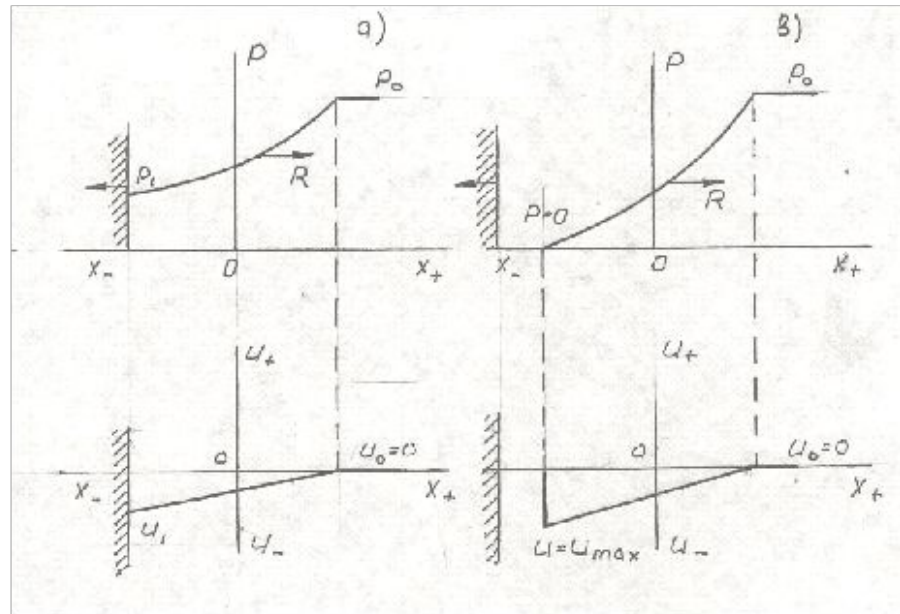


Рис. 5.5 Эпюры $P(x)$ и $U(x)$ в волне разрежения при $t < t_1$ (а) и $t > t_1$ (в)

Если в какой-то момент времени ускоренное движение поршня прекратится, прекратится и воздействие на газ (C_1 - последнее возмущение), (рис 5.6).

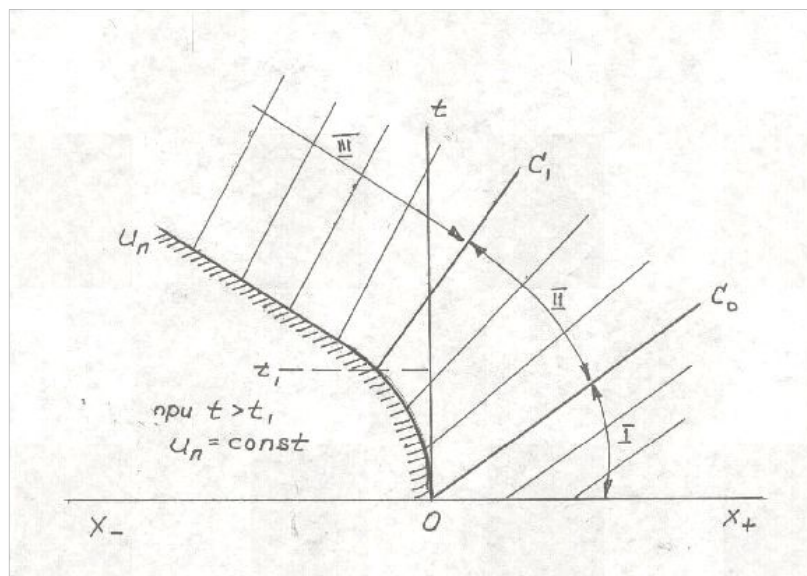


Рис 5.6 t,x - диаграмма волны разрежения.

I - область покоя

II - область воздействия волны разрежения

III - область стационарного течения газа

($P=\text{const}$, $U=\text{const}$)

C_0 - "голова" волны

C_1 - "хвост" волны (последнее возмущение)

При мгновенном вовлечении газа в движение “голова” и “хвост” ВР будут выходить из начала координат (центрированная волна разрежения).

При ускоренном движении поршня от поршня в газ побегут отдельные волны сжатия, скорость которых будет определяться наклоном C_+ характеристик. Так как каждая последующая волна будет идти по газу сжатому предыдущей волной, то каждая последующая будет распространяться с большей скоростью, чем предыдущая (рис. 5.7). В какой-то момент времени (t_1) она догонит первую волну и наложение волн сжатия обеспечит образование волны (рис. 5.8) со скачкообразным изменением параметров газа - ударной волны.

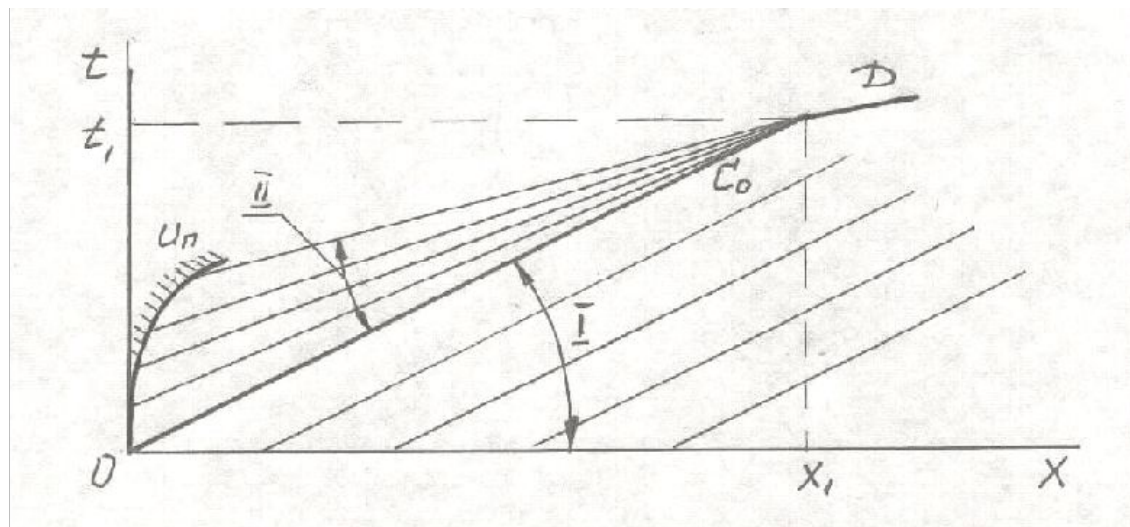


Рис. 5.7 t, x - диаграмма возникновения ударной волны.

I - область покоя

II - область сжатия

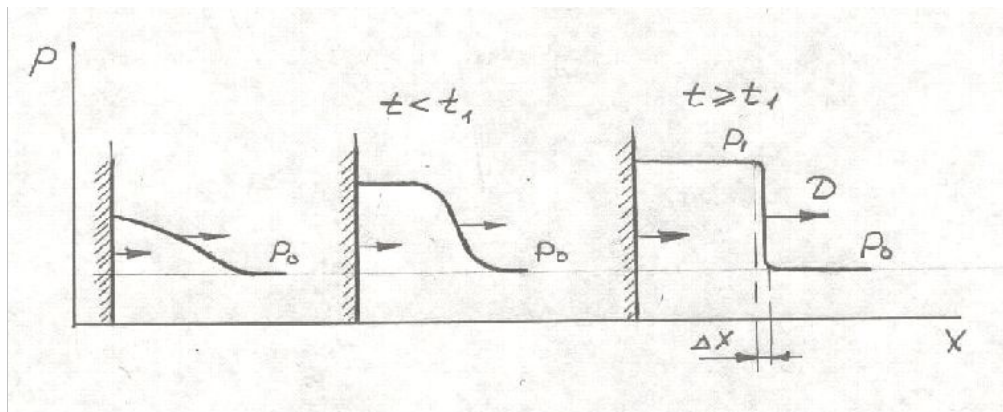


Рис 5.8 Деформация волны сжатия во времени, до превращения ее в ударную. D - скорость движения ударной волны.