

динаты  $x$  (связанной с  $t$  соотношением  $dx = vdt$ ) вычисляется по ф-лам (1), в к-рых роль  $p_2, \rho_2, v_2$  играют текущие значения ф-ций  $p(x)$  и т. д., и ф-ле (11). «Релаксирующие» параметры определяются соответствующими ур-ниями релаксации. Из первых двух ур-ний (1) следует, что  $p$  и  $V$  в релаксац. зоне связаны линейным соотношением

$$p - p_3 = (\rho_1 D)^2 (V_3 - V), \quad (12)$$

где  $p_3$  и  $V_3$  — значения  $p$  и  $V$  в начале релаксац. зоны. Точка, описывающая состояние газа на плоскости  $p, V$  (рис. 5), движется вследствие релаксации вдоль продолжения луча 3, 1 от точки 3 до точки 2, к-рая отвечает завершению релаксации и расположена на УА II. Точка 3 принадлежит УА I, вычисленной в предположении, что релаксац. процессы не происходят вовсе. Луч, на к-ром

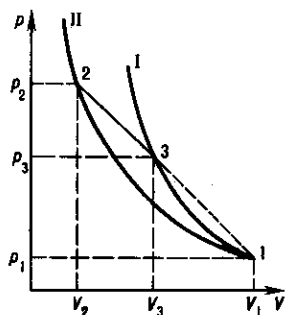


Рис. 5. Диаграмма давление ( $p$ )—объём ( $V$ ) для ударной волны, распространяющейся по газу с замедленным (релаксационным) возбуждением части степеней свободы.

расположены точки 1, 2, 3, удовлетворяет соотношению (11) и наз. прямой Михельсона—Рэлея. Качественный характер изменения  $p, \rho, v$  и  $T$  в релаксац. зоне показан на рис. 6. Темп-ра поступат. движения молекул

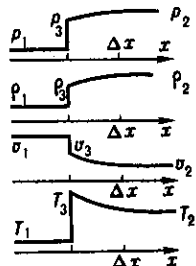


Рис. 6. Распределение давления  $p$ , плотности  $\rho$ , скорости газа  $v$  и температуры  $T$  в релаксационной зоне ударной волны, распространяющейся по газу с замедленным возбуждением части степеней свободы.

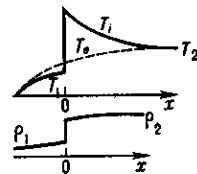
в релаксац. зоне уменьшается, т. к. энергия этого движения расходуется на возбуждение др. степеней свободы. Вследствие уменьшения  $T$  относительное увеличение давления меньше, чем плотности. Напр., расчёты ширины релаксац. зоны  $\Delta x$  и изменения  $T$  и  $\rho$ , обусловленного колебат. релаксацией и диссоциацией молекул в воздухе при  $p_1 = 1$  мм рт. ст. ( $1,33 \cdot 10^2$  Па),  $T = 300$  К и  $D = 4,7$  км/с ( $M_1 = 14,2$ ):  $\Delta x \approx 5$  мм,  $T_3 \approx 10700$  К,  $T_2 \approx 6200$  К,  $\rho_3/\rho_1 = 6$ ,  $\rho_2/\rho_1 \approx 10,2$ . Явление релаксации в У. в. широко используется для эксперим. изучения кинетики возбуждения колебаний, диссоциации, хим. реакций, ионизации и др., к-рое обычно проводится в опытах с ударными трубами.

Одномерное стационарное течение в релаксац. зоне может быть неустойчиво относительно турбулизации, подобно процессам в структуре детонац. волны (см. Детонация). Однако для этого необходимо сочетание редко (в отличие от детонац. волн) выполняемых в У. в. условий — наличия большого периода индукции в релаксац. зоне и затем быстрой релаксации.

У. в. в плазме. Когда У. в. большой интенсивности распространяется по ионизованному газу, в СУ электронный газ сам по себе (т. е. при электрон-электронных столкновениях) нагревается значительно слабее ионного, т. к. в системе координат, где У. в. покоится, втекающие в неё электроны обладают ничтожной кинетич. энергией. Большой, но тоже малый по отношению к ионам нагрев электроно-

го газа в СУ происходит за счёт его адиабатич. сжатия кулоновскими силами, не допускающими различия в степени сжатия ионов и электронов (к-рое привело бы к сильному пространственному разделению зарядов). Релаксация в У. в. связана с обменом энергией при столкновениях электронов с ионами, приводящим к выравниванию темп-р электронного и ионного газов. Релаксация происходит очень медленно (по сравнению с процессами в СУ), т. к. доля передаваемой энергии при одном столкновении частиц, сильно различающихся по массе, очень мала. В формировании структуры У. в. важную роль играет электронная теплопроводность, к-рая гораздо больше ионной и приводит к заметному прогреву электронного газа перед СУ (рис. 7).

Рис. 7. Распределение ионной  $T_i$  (сплошная линия) и электронной  $T_e$  (штриховая линия) температур и плотности газа  $\rho$  во фронте ударной волны, распространяющейся по плазме.



Ионизирующая У. в. Если за У. в., распространяющейся по неионизованному газу, темп-ра  $T_2 \geq 10000$  К, газ в У. в. ионизируется на десятки доли и более. (Относит. концентрация ионов резко возрастает с увеличением темп-ры и значительно слабее — с уменьшением плотности газа.) Осн. механизмом является ионизация атомов электронным ударом. Необходимую для этого энергию электронный газ получает при упругих столкновениях с атомами и ионами. Развивающаяся лавина электронная начинается с относительно небольшого кол-ва начальных, затравочных электронов. Они могут появляться при столкновениях атомов (хотя эфф. сечение ионизации атомами очень мало), в результате реакции ассоциативной ионизации типа  $N + O + 2,8 \text{ эВ} \rightarrow NO^+ + e$  (такой процесс идёт в воздухе), путём фотоионизации атомов перед СУ УФ-излучением, испускаемым нагретым газом за У. в. Неясность в отношении конкретного механизма нач. накопления электронов часто затрудняет интерпретацию эксперим. результатов по структуре ионизационной волны не очень большой интенсивности. В релаксац. зоне темп-ра электронов  $T_e$  меньше темп-ры атомов и ионов  $T$ , т. к. электронный газ затрачивает большую по сравнению с  $kT_e$  энергию на ионизацию атома. Зависимость  $T_e$  от  $T$  в релаксац. зоне определяется балансом энергии, затрачиваемой электронами на ионизацию и получаемой при упругих столкновениях с атомами и ионами. Чем более интенсивна У. в., тем больше разность  $T - T_e$  в релаксац. зоне. В той её части, где состав газа близок к равновесному, становится существенным процесс, обратный ионизации, т. е. электрон-ионная рекомбинация. При достижении ионизац. равновесия выравниваются и темп-ры  $T_e, T$ . Ширина релаксац. зоны обратно пропорциональна  $p_1$ .

В У. в. с темп-рами в десятки и сотни тысяч К происходит многократная ионизация атомов. Достаточное нач. накопление электронов, за к-рым следует лавинообразная ионизация, обеспечивается фотоионизацией газа перед СУ УФ-излучением, приходящим из-за У. в. Вследствие сильного теплопроводного прогрева электронного газа уже перед СУ достигается значит. степень ионизации и от горячего электронного газа несколько нагревается и ионный. На рис. 8 показаны результаты расчёта структуры, подобной У. в., распространяющейся в сильно разреженной атмосфере, когда лучистый теплообмен (см. ниже) не играет роли. Плотн.  $\rho_1$  соответствует высоте  $\sim 70$  км над уровнем моря.

Излучение У. в. При увеличении интенсивности У. в. возрастает роль эл.-магн. излучения в формировании её структуры. Если темп-ра выше неск. десятков тысяч К и газ достаточно плотный для того, чтобы излучение за У. в. было термодинамически равновесным, ширина У. в. определяется лучистым теплообменом. Все газы непроз-