

О. т. применима и для систем, состоящих из сред с плавно изменяющимися значениями n . В средах, для k -рых характерна оптич. анизотропия, а также при высоких интенсивностях световых потоков (лазерное излучение) вопрос о применимости О. т. усложняется см. *Обращение волнового фронта*).

Лит.: Тудоровский А. И., Теория оптических приборов, 2 изд., ч. 1, М.—Л., 1948; Ландсберг Г. С., Оптика, 5 изд., М., 1976. Г. Ф. Саварева.

ОБРАТИМЫЙ ПРОЦЕСС в термодинамике — процесс перехода термодинамич. системы из одного состояния в другое, k -рый может протекать как в прямом, так и в обратном направлении через те же промежуточные состояния. О. п. должен протекать столь медленно, чтобы его можно было рассматривать как непрерывный ряд равновесных состояний. Это означает, что процесс должен быть медленным по сравнению с процессами установления термодинамич. равновесия в данной системе. Строго говоря, О. п. характеризуется бесконечно медленным изменением термодинамич. параметров (плотности, давления, темп-ры и др.), определяющих равновесие системы. Такие процессы наз. также квазистатическими или квазиравновесными.

Обратимость квазиравновесного процесса следует из того, что любое промежуточное состояние есть состояние термодинамич. равновесия и не чувствительно к тому, идёт ли процесс в прямом или обратном направлении. Т. о., квазистатичность изменения термодинамич. параметров есть достаточное условие обратимости термодинамич. процесса.

О. п. — одно из осн. понятий равновесной макроскопич. термодинамики. Действительно, *первое начало термодинамики* формулируется для О. п. в виде равенства $du = \delta Q + \delta A$ между бесконечно малым приращением энергии du и суммой подведённого тепла δQ и элементарной работы δA , совершаемой над системой при квазистатич. процессе, а *второе начало термодинамики* — в виде равенства $dS = \delta Q/T$ между дифференциалом энтропии dS и отношением δQ к темп-ре T в абс. шкале, что справедливо для О. п. Для *необратимого процесса* второе начало формулируется в виде неравенства $dS > \delta Q/T$, ограничивающего возможные направления процесса.

Все процессы в природе протекают с конечной скоростью и сопровождаются явлениями трения или теплопроводности, поэтому они необратимы. О. п. — идеализация реальных процессов, протекающих так медленно, что необратимыми явлениями можно пренебречь. Иногда быстрые процессы можно рассматривать приближённо как квазиравновесные, если равновесие успевает установиться не во всей системе, а в её малых элементах объёма, и *производством энтропии* можно пренебречь (напр., распространение звука в приближении идеальной гидродинамики).

Микроскопич. теорию О. п. изучают в *статистической физике*, где рассматривают малые квазистатич. возмущения распределения Гиббса при медленном изменении внеш. параметров.

Лит. см. при ст. *Термодинамика*.

Д. Н. Зубарев

ОБРАТНАЯ ВОЛНА — волна с противоположно направленными фазовой и групповой скоростями. Впервые термин «О. в.» введён в ВЧ-электронике, где на взаимодействии О. в. с электронными пучками основано действие широкого класса СВЧ-приборов — *ламп обратной волны*. Волны с подобными свойствами известны также в пространственно-периодич. структурах и средах.

Простейшими примерами О. в. являются системы с плоскими волнами, в частности в линиях передачи, где распространение волн возможно только вдоль k -л. определённого направления. В однородных линиях передачи для гармонич. процессов $\text{Re exp } i(\omega t - kz)$, когда фазовая скорость равна $v_\phi = \omega/k$, а

групповая скорость $v_{\text{гр}} = d\omega/dk$, существует О. в. при

$$\frac{k}{\omega} \frac{d\omega}{dk} < 0. \quad (*)$$

Здесь $\omega = \omega(k)$ — дисперсионная характеристика (см. *Дисперсия волн*), k — волновое число.

По существу $v_{\text{гр}}$ является скоростью перемещения волнового пакета — набора гармонич. волн с частотами $\omega \in (\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega)$ из узкого интервала $\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$, так что поток энергии S и её погонная плотность W связаны соотношением $S = Wv_{\text{гр}}$. Поскольку W , вообще говоря, положительна, то в О. в. направление переноса энергии противоположно направлению перемещения фаз.

Условие (*), согласно k -рому $(\omega/v_\phi)(dv_\phi/d\omega) > 1$, может выполняться только в системах с т. н. аномальной дисперсией, когда $(\omega/v_\phi)(dv_\phi/d\omega) > 0$. На рис. 1 приведено несколько примеров дисперсионных характеристик: для волн в полых волноводах с замагниченной плазмой (1) и в волноводах, частично заполненных изотропной плазмой (2), для быстрых циклотронных волн в потоках заряд. частиц, направляемых магн. полем (3).

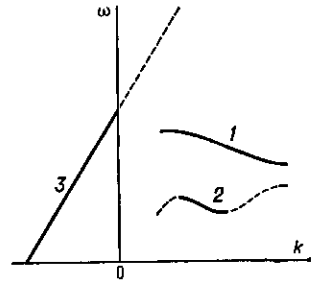


Рис. 1. Дисперсионные характеристики обратных волн (сплошные линии); пунктирные линии соответствуют прямым волнам.

В периодич. структурах, когда волновые процессы можно представить в виде набора (ряд Флоке) пространств. гармоник

$$\text{Re exp } i[\omega t - k_0 x - (2\pi/D)n x], \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где D — период, обратными являются гармоники с $n < -(k_0 D/2\pi)$, поскольку направление их фазовых скоростей противоположно направлению потока энергии волны. При синхронном взаимодействии одной из таких пространств. гармоник с k -л. др. волнами, потоками частиц или просто периодически расположенными излучателями термин «О. в.» относится и к волне в целом, если вклад остальных гармоник в энергообмен несуществен.

Напр., для цепочки связанных маятников дисперсионная характеристика состоит из отд. ветвей (рис. 2), k -рые в области $k < 0$ соответствуют обратным гармоникам, т. к. их фазовые скорости отрицательны, а направление групповой скорости, общей для всех пространств. гармоник, положительно. В фильтре высоких частот (рис. 3, а) О. в., в отличие от предыдущего, является и осн. гармоника, расположенная в интервале $-\pi/D < k < \pi/D$.

Как известно, в потоках частиц, в линиях передач с активными элементами и вообще в неравновесных средах возможно распространение волновых возмущений с т. н. отрицательной «псевдоэнергией», т. е. волн, возбуждение k -рых приводит к уменьшению энергии системы. Если такая волна обратная, $(k/\omega)(d\omega/dk) < 0$, то направление переноса энергии в ней будет совпадать с направлением фазовой, а не групповой скорости. О. в. с положительной и отрицательной энергиями приводит к разл. эффектам при синхронном взаимодействии их с обычными прямыми, $(k/\omega)(d\omega/dk) > 0$, волнами. Если в первом случае возникает полоса запаривания (рис. 4, а), т. е. область частот $\Delta\omega_3$, где $\text{Im } k \neq 0$ даже при отсутствии тепловых потерь, то во втором — система становится абсолютно неустойчивой и амплитуды обеих взаимодействующих волн в полосе $\Delta k_{\text{н}}$ (рис. 4, б) нарастают во времени экспоненциально; причём в волне с отрицат. «псевдоэнергией» это происходит за счёт уменьшения энергии, а в волне с положит. энергией — соответственно за счёт её увеличения.