

буждаемых волн. П. н. приводит к возникновению турбулентности и ограничению предельных токов в системе плазма — пучок. П. н. используется: для возбуждения от плазмы очень интенсивного когерентного излучения в радиодиапазона до субмиллиметрового и даже, возможно, светового; для ускорения заряж. частиц волнами, возбуждаемыми пучками в плазме; в неравновесной плазме и т. п. П. н. можно управлять, что позволяет даже отрицат. эффекты превратить в полезные. Напр., использовать эффект турбулизации плазмы для пучковой и турбулентного нагрева до термоядерных темп-р.

Условия возникновения пучковой неустойчивости. П. н. возникает, если имеет место к.-л. элементарный механизм резонансного взаимодействия волны с частицами пучка, приводящий к излучению волн отд. частицей, такой как, напр., эффект Черенкова, нормальный и аномальный эффекты Доплера и т. п. Чтобы спонтанное излучение отд. частицы превратилось в индуцированное или когерентное индуцированное излучение, необходима группировка частиц пучка в области тормозящих фаз волны, где они отдают энергию эл.-магн. полю. В большинстве случаев группировка происходит автоматически, т. е. имеет место автомодуляция. Если в системе плазма — пучок наряду с процессами излучения есть и процессы поглощения, то для развития П. н. необходимо, чтобы число частиц пучка со скоростями $v > v_{\phi}$ (v_{ϕ} — фазовая скорость волны) превосходило число частиц с $v < v_{\phi}$, т. е. $\partial f_0 / \partial v > 0$, где f_0 — ф-ция распределения электронов пучка. Если $\partial f_0 / \partial v < 0$, преобладают процессы поглощения, т. е. имеет место *Ландау затухание*. С квантовой точки зрения возникновение П. н. означает, что благодаря преимуществ. заселению верх. уровней энергии (частиц пучка) происходит больше актов индуциров. испускания, чем индуциров. поглощения. Наиб. полное описание П. н. достигается с помощью самосогласов. системы ур-ний, состоящих из кинетич. ур-ния Власова для плазмы и пучка и ур-ний Максвелла. Однако при рассмотрении ряда разновидностей П. н. достаточно ограничиться гидродинамич. рассмотрением. В частности, это относится к П. н., возникающей при взаимодействии моноэнергетич. пучка (или пучка с очень малым разбросом по скоростям) с холодной плазмой (см. *Плазменно-пучковый разряд*, *Плазменная электроника*). В этом случае инкремент неустойчивости $\delta = \text{Im} \omega$ имеет макс. значение $\delta_{\text{макс}} \sim \omega_p (n_b/n_p)^{1/3}$. Малый разброс по скоростям пучка означает, что $\Delta v \ll \delta/k$, т. е. $\Delta v/v \ll (n_b/n_p)^{1/3}$, и весь пучок как целое находится в резонансе с неустойчивыми волнами (здесь n_b — плотность пучка, n_p — плотность плазмы, k — волновое число, ω_p — плазменная частота). Если разброс по скоростям не мал, $\Delta v \gg \delta/k$, то для исследования П. н. используется кинетич. рассмотрение. Существует большое разнообразие П. н., напр. неустойчивости при взаимодействии ионных пучков с плазмой, неустойчивости относительно движения электронов и ионов плазмы (неустойчивость Будкера — Бунемана), целый набор П. н. при наличии внеш. пост. магн. поля.

Нелинейное взаимодействие. С ростом амплитуды возбуждаемых волн возникают нелинейные эффекты, ограничивающие амплитуду волн и приводящие к изменению параметров системы плазма — пучок благодаря обратному воздействию возбуждаемых волн. При возбуждении широких волновых пакетов, фазовые скорости к-рых плотно заполняют область изменения фазовых скоростей, области захвата частиц пучка соседними волнами перекрываются. При этом благодаря случайному характеру фаз волн движение частицы аналогично броуновскому и происходит диффузия резонансных частиц в пространстве скоростей. Для описания процессов взаимодействия пучка с плазмой в этом случае возможен статистич. подход.

Система ур-ний *квазилинейной теории плазмы* описывает диффузию частиц в пространстве скоростей, обрат-

ное влияние возбуждаемых волн, увеличение разброса по скоростям в пучках и нагрев плазмы, но не учитывает др. нелинейные эффекты, напр. нелинейное взаимодействие волн между собой. Как следует из квазилинейной теории, около трети энергии пучка переходит в энергию возбуждаемых волн. Спектр сильно возбуждаемых волн уширяется, и значительно увеличивается длина релаксации пучка.

При взаимодействии с плазмой моноэнергетич. пучка вначале возбуждается очень узкий пакет волн с макс. инкрементом при $k_0 = \omega_p/v$ и с полушириной волнового пакета $\Delta k_0 = (n_b/n_p)^{1/3} k_0$. При возрастании амплитуды волн в m раз ширина спектра уменьшается в \sqrt{m} раз, т. е. волновой пакет сильно сужается, и возбуждаемому волну можно считать монохроматической. С дальнейшим ростом амплитуды волны происходит захват частиц пучка в потенциальную яму волны. При осцилляциях в потенциальной яме сгустки, на к-рые разбивается электронный пучок, попеременно смещаются в область тормозящих фаз волны и отдают энергию, а затем — в область ускоряющих фаз и получают энергию от волны, так что в среднем обмен энергией между электронами пучка и волной уже не происходит. Решение на ЭВМ системы ур-ний, описывающих возбуждение монохроматич. волны на нелинейной стадии, представляет собой монохроматич. волну с осциллирующей во времени и в пространстве амплитудой.

Пучковая неустойчивость в релятивистских пучках. Инкремент П. н., возбуждаемой релятивистским пучком, меньше из-за релятивистского возрастания продольной и поперечной масс электронов пучка (см. *Плазменная электроника*). Однако инкремент не является единств. характеристикой эффективности плазменно-пучкового взаимодействия. Важны доля энергии пучка, передаваемой им на возбуждение волн, макс. амплитуда этих волн, а также время передачи энергии плазме, т. е. время релаксации пучка. Особенностью взаимодействия релятивистского пучка с плазмой является то, что обратное влияние возбуждаемых пучком волн, даже при значит. энергетич. разбросе, не приводит к большому разбросу по скоростям, поэтому взаимодействие продолжается дольше и доля энергии, передаваемая пучком плазме, значительно больше, чем в нерелятивистском случае ($\sim 0,35$ энергии пучка). Максимально достижимая напряжённость электр. поля также значительно больше, чем в нерелятивистском случае.

Осн. механизмом, ограничивающим П. н. в слабо-турбулентной плазме, является индуциров. рассеяние ленгмюровских волн на ионах, к-рое приводит к перекачке колебаний из резонансной с пучком области в область больших фазовых скоростей. В сильно-турбулентной плазме существ. влияние на развитие П. н. оказывает *модуляционная неустойчивость*, к-рая возникает при достаточно высоком уровне энергии возбуждаемых волн и приводит к перекачке энергии возбуждаемых волн в область малых фазовых скоростей, где происходит их диссипация в результате затухания Ландау. Откачка колебаний из резонансной области может либо вообще сорвать П. н., либо существенно снизить уровень энергии возбуждаемых волн.

Т. к. П. н. возникают в результате резонансного взаимодействия волн с частицами пучка, сводящегося к неск. элементарным эффектам, а также к фазировке и группировке частиц, то устранить или ослабить неустойчивость можно созданием условий, при к-рых соответств. элементарные процессы, фазировка и группировка невозможны. Напр., если на вход системы плазма — пучок задать сигнал с амплитудой, превышающей флуктуационную, или промодулировать пучок на входе системы, то группировка и фазировка создаются только для возбуждения волны заданной частоты, а возбуждение всех остальных волн невозможно. Нарушить условия резонанса, необходимые для развития П. н., можно изменением фазовой скорости волны, напр. из-за