

04; 10

© 1991 г.

## О ВОЗМОЖНОСТИ «КЛАСТЕРНОГО» УТС

А. С. Кингсен, В. В. Окоржов, И. В. Чувило

Предложен способ генерации высокотемпературной термоядерной плазмы при встречном столкновении ускоренных сгустков кластеров тяжелого водорода внутри магнитной ловушки. Отмечено, что проверка физической работоспособности такого способа генерации плазмы возможна в настоящее время на созданных и работающих установках.

В работе [1] предложен способ генерации высокотемпературной плазмы с помощью встречного столкновения ускоренных до удельной энергии 10—20 КэВ/дейтон водородных кластерных сгустков внутри магнитной ловушки.

Ускорение заряженных кластеров тяжелых изотопов водорода  $D_{2n+1}^+$  (где  $n \sim 10^3-10^4$ ) (см., например, [2-4]) — это одна из возможностей ускорения с высоким КПД чистых частиц термоядерного топлива с последующим эффективным преобразованием кинетической энергии кластерных сгустков в энергию хаотического теплового движения дейтронов в плазме, образующейся в результате столкновения кластерных сгустков.

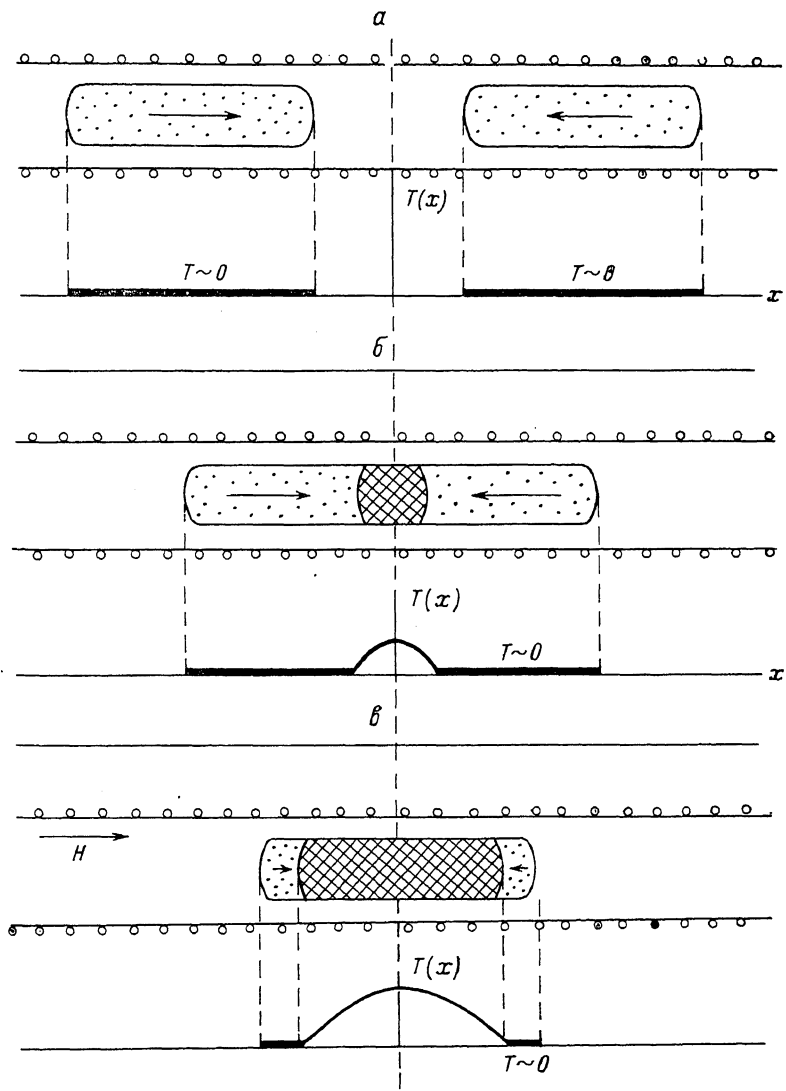
Благодаря большому числу  $10^3-10^4$  атомов дейтерия на единицу заряда в кластерах можно довести плотность частиц в ускоренных сгустках до значений, обеспечивающих взаимное торможение всех дейтронов сталкивающихся кластерных сгустков. Тем самым кластеры позволяют ускорять необходимую для иницирования термоядерной реакции массу вещества при уменьшенном на 3—4 порядка величине влияния объемного заряда пучка. С другой стороны, малый удельный заряд кластеров  $e/m \sim 10^3-10^4$  все-таки достаточен для их ускорения в установках разумных размеров и стоимости для задачи такого масштаба, как проблема УТС.

Хотя применение ускорительной техники характерно прежде всего для инерциального УТС, ускорение и столкновение кластеров наиболее выгодны для заполнения горячей плазмой квазистационарных и импульсных систем — магнитных ловушек. Малый удельный заряд обеспечивает большую величину мариоровского радиуса кластера  $\rho_{nc}$ , что в сочетании с умеренными значениями тока кластерного пучка (0.5—5 А) позволяет успешно вести инжекцию через магнитные поверхности в достаточно совершенных ловушках. Это весьма важное преимущество по сравнению с энергичными плазменными сгустками. Таковым обладают, правда, и мощные пучки нейтралов, но пучки кластеров могут обеспечить в принципе большие потоки мощности. К тому же ненулевой заряд позволяет использовать траекторию ненулевой кривизны, что исключает «отравление» либо разрушение инжектора термоядерными нейтронами.

Для экспериментальной проверки физической работоспособности такого способа получения высокотемпературной плазмы желательно использовать возможности уменьшения амплитудного значения тока кластерных сгустков. Такие возможности были рассмотрены в работе [5]. В этой работе было отмечено, что уменьшить импульсный ток кластерных сгустков можно а) за счет изменения его длины либо б) за счет увеличения массы каждого кластера (при соответствующем увеличении энергии ускорителя, чтобы результирующая удельная энергия 20 КэВ/дейтон оставалась постоянной).

Совместное использование этих двух факторов может привести к уменьшению необходимой амплитуды тока для генерации термоядерной плазмы таким способом на 2—3 порядка величины — до 0.5 А/имп.

Фактором, допускающим дальнейшее снижение амплитудного значения тока кластерных пучков, и, несомненно, благоприятствующим возможности экспериментальной проверки физической работоспособности этого способа генерации плазмы, является турбулентная релаксация (торможение) сгустков плазмы, образующихся при столкновении кластерных сгустков.



Постепенный разогрев ускоренных кластерных сгустков по мере их проникновения друг в друга.

а — сгустки еще не столкнулись, их температура равна 0; б, в — температура сгустков растет по мере увеличения доли взаимодействующих сгустков.

В настоящее время экспериментально твердо установлено, что возбуждение ионно-звуковой неустойчивости в двухпотоковой плазме приводит к эффективному торможению сталкивающихся плазменных сгустков на длине, много меньшей длины торможения, определяемой парными соударениями (см., например, [6, 7]).

В процессе столкновения двух ускоренных кластерных сгустков по мере их проникновения друг в друга температура образующейся плазмы непрерывно растет (см. рисунок).

На начальной стадии взаимного проникновения кластерных сгустков с запасом выполняется условие развития гидродинамической двухпоточковой неустойчивости [8]  $V \gg v_{Ti}$ , где  $V$  — гидродинамическая скорость потока;  $v_{Ti}$  — тепловая скорость ионов, образующихся при диссипации и ионизации ионов  $D^+$ . Эта неустойчивость при высоких относительных скоростях сгустков может релаксировать при достаточно малой доле реализованной свободной энергии. Однако двухпоточковая система остается неравновесной, в ней возможны нелинейные неустойчивости с участием волн отрицательной энергии. Последние могут быть спровоцированы относительно маломощным сторонним источником турбулентности; в работе [7], например, эту роль выполнял скинированный турбулентный разряд, возбуждавший ионно-звуковые шумы при известном условии  $j > ne (T_e/M)^{1/2}$ . Если конструкция ловушки затрудняет использование прямого разряда, то возможны и бесконтактные методы создания затравочной турбулентности, например лазер.

Тем самым проверка физической работоспособности предлагаемого способа генерации высокотемпературной плазмы становится возможной в настоящее время на созданных и работающих установках [9, 10]. Плотность потока атомарного водорода, достигнутая в ускоренных кластерных пучках, получается  $\sim 30 \text{ А/см}^2$  [9]. Создать экспериментальные условия для возникновения и развития турбулентного торможения, управляя этим процессом путем локального увеличения плотности тока в сталкивающихся плазменных струях, как это сделано в работе [9] возможно, по-видимому, и при столкновении ускоренных кластерных сгустков.

Вопрос о том, как влияет на развитие турбулентности тот факт, что в нашем случае сталкиваются не плазменные сгустки, как в [6, 7], а практически квазинейтральные сгустки холодного водорода в виде кластеров, требует, на наш взгляд, дополнительных исследований. Равным образом нуждается в дополнительном рассмотрении вопрос об удержании плазмы, накапливающейся в ловушке того или иного типа вследствие взаимодействия кластерных сгустков, поскольку плазма эта является квазинейтральной лишь с точностью  $10^{-3}$ — $10^{-4}$ , что при термоядерных параметрах означает генерацию достаточно сильных электрических полей. Например, потенциал плазмы в ловушке должен на 1—3 порядка превышать равновесное значение  $T/e$ .

Некоторые особенности генерации высокотемпературной плазмы при встречном столкновении водородных кластерных сгустков внутри магнитной ловушки состоят в следующем.

1. Достоинство способа, как это следует из вышеизложенного, — возможность экспериментальной проверки физической работоспособности при масштабах экспериментальных установок, на 2—3 порядка меньших, чем это необходимо для промышленно работающих установок, в отличие, например, от инерциального УТС, где вопрос о критическом энергокладе, как и некоторые другие принципиальные моменты, не допускают скейлинга на малых установках.

2. Предлагаемый способ создания высокотемпературной плазмы не имеет принципиальных ограничений для получения плазмы с температурой 100 кэВ с высоким КПД преобразования затраченной энергии в энергию плазмы, необходимо только довести удельную энергию ускоренных кластеров до 100—200 кэВ/дейтон. С точки зрения ускорительной техники задача эта вполне разрешима. Как следствие, могут стать доступными эксперименты, начинающие освоение плазмы с температурой, необходимой для горения  $D-D$  смеси. Обоснованность этого утверждения связана с тем, что получение высокотемпературной плазмы путем столкновения ускоренных сгустков водородных кластеров позволяет использовать хорошо отработанную в настоящее время и продолжающую непрерывно развиваться (в частности, в связи с программой термоядерного синтеза на тяжелых ионах) технику современных тяжелоионных ускорителей.

3. Релаксация продольной энергии ионов на длине, много меньшей кулоновской, возникающая в бесстолкновительной плазме в результате развития плазменной турбулентности при встречном столкновении двух кластерных сгустков, связана с передачей импульса частицами сталкивающихся плазменных сгустков (в которые превращаются кластерные сгустки) на довольно коротких расстояниях. Тем самым формируются своеобразные «пробки», замедляющие

разлет горячей плазмы, образующейся в центральной части пробкотрона. Представляют интерес экспериментальные следствия такого продольного удержания сгустка плазмы, получаемого и удерживаемого в центральной части пробкотрона с помощью встречных пучков водородных кластеров при длительности ускоренных сгустков миллисекундного диапазона и соответствующей длине пробкотрона.

4. Турбулентная релаксация на низкочастотных шумах приводит к обогащению высокоэнергичной части функции распределения ионов [11, 12] и тем самым увеличивает мощность термоядерного энерговыделения в образующейся плазме. Это позволяет создать термоядерную плазму без «зажигания» (усилитель мощности) при величинах, примерно на порядок меньших, чем требует критерий Лоусона [13, 14].

Экспериментальным свидетельством почти полной изотропизации направленных скоростей частиц двух сталкивающихся плазменных сгустков в результате их турбулентного торможения может служить, например, работа [6].

5. Наконец, экспериментальная проверка работоспособности такой идеи генерации термоядерной плазмы связана с процессами, уровень понимания и экспериментальной проработки которых в настоящее время достаточно высок. Это относится не только к формированию [2-4] и ускорению [9, 10] кластерных сгустков, но и к процессам, характеризующим превращение ускоренных сгустков кластеров в плазму при встречных столкновениях: к непосредственной ионизации ионами и атомами одного из пучков ионов и атомов другого встречного пучка, а также последовательной перезарядке и обдирке частиц каждого из встречных потоков. Достаточный массив информации накоплен в области плазменной турбулентности, в частности динамики потоковых неустойчивостей.

#### Список литературы

- [1] Окорочков В. В., Чувило И. В. Препринт ИТЭФ. № 108. М., 1986.
- [2] Becker E. W., Falter H., Hagena O. F. et al. // Nucl. Fus. 1977. Vol. 17. P. 647—649.
- [3] Mozes M. O., Martin J., Salin R. // J. de Phys. 1977. Colloque C2. Suppl. N7. Vol. 38.
- [4] Chanut Y., Martin J., Salin R., Mozes M. O. // Surf. Sci. 1981. Vol. 106. P. 563—568.
- [5] Чувило И. В., Окорочков В. В. Препринт ИТЭФ. № 26. М., 1988.
- [6] Житлухин А. М., Илюшин И. В., Софронов В. М., Скворцов Ю. В. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 3. С. 509—518.
- [7] Аранчук Л. Е., Калинин Ю. Г., Кингсен А. С. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. Вып. 5. С. 1849.
- [8] Бриггс Р. // Достижения физики плазмы / Под ред. А. Саймона, У. Томпсона. М.: Мир, 1974. С. 132.
- [9] Mozes M. O. KFK 4068. Karlsruhe, 1986.
- [10] Becker E. W., Falter H., Hagena O. F. et al. KFK 2016. Karlsruhe, 1974.
- [11] Кингсен А. С. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. Вып. 6. С. 2179.
- [12] Кингсен А. С., Чукбар К. В. // Тез. докл. Всесоюз. конф. по взаимодействию электромагнитных волн с плазмой. Душанбе, 1979. С. 64.
- [13] Jassby D. L. // Nucl. Fusion. 1977. Vol. 17. N 2. P. 309—365.
- [14] Мухоматов В. С. // Физика плазмы. 1980. Т. 1. Ч. 1. С. 73.

Поступило в Редакцию  
12 декабря 1990 г.  
В окончательной редакции  
14 мая 1991 г.