

Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов

**Диффузия при неустойчивости
сильно неоднородной плазмы**

А н н о т а ц и я

Исследована диффузия поперек магнитного поля, измерена корреляционная функция колебаний при неустойчивости сильно неоднородной плазмы /1,2/. По корреляционной функции найдено, что время корреляции фаз колебаний составляет 5-6 периодов. Коэффициент диффузии растёт с ростом амплитуды колебаний. При $\tilde{n}/n \sim 1$ коэффициент диффузии обратно пропорционален магнитному полю и по абсолютной величине близок к Бомовскому.

Как было показано ранее /1,2/, в сильно неоднородной по плотности плазме ($\rho_i \geq R$, где ρ_i - ларморовский радиус ионов, R - радиус системы) развивается неустойчивость. Неустойчивость проявляется в возбуждении азимутальных волн, имеющих составляющую вдоль магнитного поля, причем длины волны гармоник кратны длине плазменного цилиндра. Частота колебаний практически не зависит от магнитного поля и обратно пропорциональна полуширине столба плазмы. Азимутальная фазовая скорость одинакова для всех волн в спектре и близка к скорости ионного звука.

Было найдено /2/, что при развитой неустойчивости амплитуда колебаний плотности достигает величины $\tilde{n}/n \sim 1$, причём волна является потенциальной, т.е. выполняется соотношение $\tilde{n}/n \approx e\tilde{\varphi}/T$; здесь \tilde{n} , $\tilde{\varphi}$ - переменные составляющие плотности и потенциала. Состояние плазмы является турбулентным, причем время корреляции фаз колебаний составляет $\sim 5-10$ периодов.

В настоящей работе измерена корреляционная функция колебаний и исследована диффузия поперек магнитного поля. В согласии с /2/ найдено, что время корреляции фаз составляет ~ 5 периодов. Диффузия носит конвективный характер, причем коэффициент диффузии обратно пропорционален магнитному полю и по абсолютной величине близок к Бомовскому.

Эксперименты проводились на установке (рис.1) /1,2/, в которой плазма образуется при поверхностной ионизации паров калия на вольфрамовой пластине с температурой $\sim 2000^\circ\text{K}$. Диаметр пластины 2 см, длина столба плазмы 20 см, диаметр камеры 4 см. Эксперименты проводились при плотности $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$, при магнитном поле от 400 до 1200 эрст.

Коэффициент диффузии определялся по потоку плазмы поперек магнитного поля /3/. Измеритель потока (рис.1) представляет собой установленные на границе столба плазмы пластины, между которыми приложен потенциал, достаточный для полного разделения электронов и ионов. Таким образом, ток в цепи пластин определяется поперечным потоком плазмы $(nV)_z$. Зная градиент плотности $dn/dz \sim n_0/R$ (n_0 - плотность на оси), определяем коэффициент диффузии $D \equiv (nV)_z / \frac{dn}{dz}$.

Отметим, что использованный в настоящей работе измеритель потока по конструкции подобен измерителю /3/ и отличается от /1/. Пластины измерителя /1/ представляли собой пакет колец, не заключенных в экран. Настоящий измеритель имеет вид коробочки с центральной пластиной, причём конструкция обеспечивает более точную и надёжную сборку. Коробочка заключена в экран и "утоплена" относительно него на $\Delta \sim 0,5 \text{ мм}$.

Для измерения корреляционной функции (КФ) использовался автоматический коррелограф /4,5/, регистрирующий знаковую КФ. Блок-схема коррелографа приведена на рис.2. Время задержки меняется от 0 до 300 мксек ступенями по 3 мксек. Время интегрирования составляет 500 мсек. Амплитуда входного сигнала должна лежать в пределах 5-300 мв.

Отметим, что знаковая КФ $F(\tau)$ связана с нормированной КФ $\rho(\tau)$ следующим соотношением /5,6/: $\rho(\tau) = -\cos 2\pi F(\tau)$.

Типичный спектр колебаний показан на рис.3. На рис.4 представлена автокорреляционная функция (АКФ) колебаний плотности. Для сравнения приведена АКФ синусоидального сигнала с генератора. Шкала АКФ по оси ординат задана по амплитуде АКФ синусоидального сигнала. Видно, что амплитуда АКФ падает, что указывает на хаотизацию фаз колебаний. Амплитуда АКФ обращается в ноль (полная хаотизация) через 5-6 периодов. Таким образом, в согласии с результатами качественного корреляционного анализа /2/ находим, что время корреляции фаз колебаний составляет $\sim 5-6$ периодов.

Как было показано в /2/, меняя характер слоя у поверхности ионизатора, можно менять амплитуду колебаний, причем амплитуда минимальна при электронном слое. Оказалось, что коэффициент диффузии растёт с ростом амплитуды колебаний. На рис.5 показана зависимость D от амплитуды первой гармоники вблизи края столба ($r = 9 \text{ мм}$). Полная амплитуда колебаний достигает величины $\tilde{n}/n \sim 1$ при амплитуде первой гармоники $\sim 0,25$.

Среднее значение D при $\tilde{n}/n \sim 1$ и $H = 1000$ эрст достигает величины $(7 \pm 1,5) \cdot 10^2 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$. При этом классический коэффициент диффузии должен иметь величину $D_{ei} \sim 1 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, а Бомовский /7/ $D_B = \frac{1}{16} \frac{cT}{eH} \sim 2 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$. Таким образом, измеренное значение D близко к Бомовскому.

Как видно из рис.6, коэффициент диффузии обратно пропорционален магнитному полю.

Эти результаты расходятся с результатами измерения коэффициента диффузии $/I/$, полученными с помощью кольцевого измерителя без экрана. В $/I/$ было найдено, что при $n \sim 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ и $H \sim 1000$ эрст эрст достигает величины $D \sim (5-6) \cdot 10^4 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$. Оказалось, что эта величина не меняется при изменении амплитуды колебаний, откуда можно сделать вывод, что измеряемый в таком эксперименте поток не связан с неустойчивостью. Анализ работы измерителя показывает, что это действительно так.

Допустим, диффузии плазмы поперек поля нет. Тогда диаметр плазменного столба совпадает с диаметром ионизатора, т.к. ларморовские радиусы электронов малы ($\rho_e \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ при $H = 400$ эрст). Однако, ларморовские радиусы ионов велики ($\rho_i \sim R$) и на измеритель, расположенный вне столба плазмы, идет поток ионов (назовём его ларморовским потоком). Если пластины измерителя строго перпендикулярны силовым линиям магнитного поля и "утоплены" в экран на $\Delta > \rho_e$, то электроны не могут попадать на пластины. Тогда поток ионов приводит только к изменению плавающего потенциала пластин измерителя, но не даёт вклада в его ток. Если же в результате перекоса измерителя относительно силовых линий на пластины могут попадать электроны, появляется ток. В отсутствие экрана этот эффект усиливается. При достаточном количестве электронов ток измерителя будет определяться ларморовским потоком ионов.

Как уже говорилось, в $/I/$ использовался измеритель без экрана, причем его конструкция не исключала малые перекосы относительно поля. Таким образом, в этом случае, по-видимому, измерялся ларморовский ток.

Измеритель, использованный в настоящей работе, заключен в экран, причем $\Delta = 0,5 \text{ мм} \gg \rho_e$. Конструкция измерителя более надежна, что снижает вероятность перекосов. Таким образом, паразитный поток электронов должен быть значительно снижен.

Экспериментальной проверкой правильности работы измерителя может служить малость потока в отсутствие неустойчивости (напомним, что D_{ei} мал) и зависимость его от амплитуды колебаний.

Как было показано выше, коэффициент диффузии $D \equiv \frac{(nV)_z}{dn/dr}$ падает с уменьшением амплитуды. При малых амплитудах (электронный слой) D имеет величину $\lesssim 60 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, что, по-видимому, и определяется паразитным потоком, т.е. даёт нижнюю границу точности определения D .

Таким образом, измерения, выполненные при больших амплитудах, где значительно превышает эту величину можно считать достаточно надёжными.

Для выявления механизма диффузии поперек магнитного поля снимались осциллограммы колебаний плотности в столбе плазмы и тока измерителя. В отсутствие неустойчивости (малые амплитуды колебаний) ток на измеритель мал по величине и постоянен во времени (рис.7). При развитой неустойчивости ток на измеритель имеет вид пиков, скоррелированных с колебаниями плотности (рис.8). При этом максимумы тока наблюдаются в фазе с максимумами плотности. Таким образом, поток плазмы поперек поля имеет характер выбросов. Выброс происходит практически одновременно по всей длине плазменного столба (отсутствует сдвиг фаз в разных точках на оси) и бежит вместе с волной по азимуту (азимутальный сдвиг фаз выбросов тока совпадает со сдвигом фаз колебаний плотности).

Итак, можно сделать вывод, что при исследованной неустойчивости сильно неоднородной плазмы диффузия поперек поля имеет конвективный характер, причем коэффициент диффузии обратно пропорционален магнитному полю и по абсолютной величине близок к Бомовскому.

Выражаем благодарность И.А. Богащю за помощь в экспериментах.

Л и т е р а т у р а

1. Н.С.Бучельникова, А.М.Кудрявцев, Р.А.Салимов ЖТФ 35, 72, 1965.
2. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Неустойчивость сильно неоднородной плазмы. ЖТФ. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 27, 1966г.
3. Н.С.Бучельникова. Яд. синтез 3 № 2, 1966.
4. А.В.Недоспасов, С.С.Соболев ПТЭ, 1966.
Доклад на УП международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Белград, 1965.
5. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман.
Исследование турбулентной плазмы при ионно-звуковой неустойчивости. ЖТФ.
Препринт ИЯФ СО АН СССР № 49, 1966.
6. Б.С.Синицын. Автоматические корреляторы. Новосибирск, 1964.
7. D.Bohm, E. Burhop et al. "The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields", A. Guthrie, R. K. Wakerling, New York, 1949.

Подписи к рисункам.

- Рис. 1. а) схема установки:
1-катушки магнитного поля; 2-ионизатор; 3-электрод;
4-напылитель; 5-зонд; 6-измеритель диффузии.
в) измеритель диффузии:
 $l = 8 \text{ мм}; h = 30 \text{ мм}; d = 1,5 \text{ мм}.$
7-измерительные пластины; 8-экран.
- Рис. 2. Блок-схема коррелографа.
- Рис. 3. Спектр колебаний $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; H = 800 \text{ эрст}.$
- Рис. 4. Автокорреляционная функция сигнала с зонда (верхняя кривая) и синусоидального сигнала с генератора ($f = 25 \text{ кгц}.$)
- Рис. 5. Зависимость коэффициента диффузии от амплитуды колебаний $H = 800 \text{ эрстед},$
- Рис. 6. Зависимость коэффициента диффузии от магнитного поля.
- Рис. 7. Осциллограмма плотности (верхний луч) и тока измерителя (нижний луч) в отсутствие неустойчивости. Стрелками указаны нулевые уровни. $H = 800 \text{ эрст. } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$
- Рис. 8. Осциллограмма плотности (верхний луч) и тока измерителя (нижний луч) при развитой неустойчивости. Стрелками указаны нулевые уровни. $H = 800 \text{ эрст}; n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3},$ длительность развертки $20 \frac{\text{мсек}}{\text{см}};$ зонд и измеритель расположены под углом $90^\circ.$

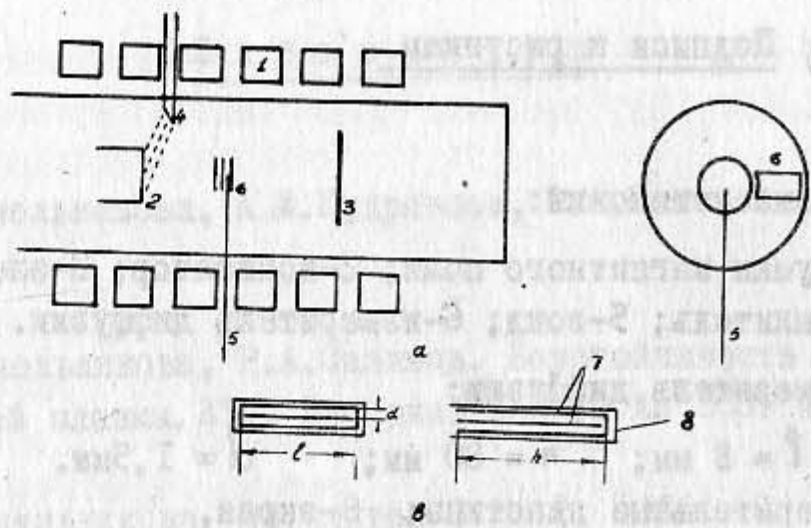


Рис. 1.

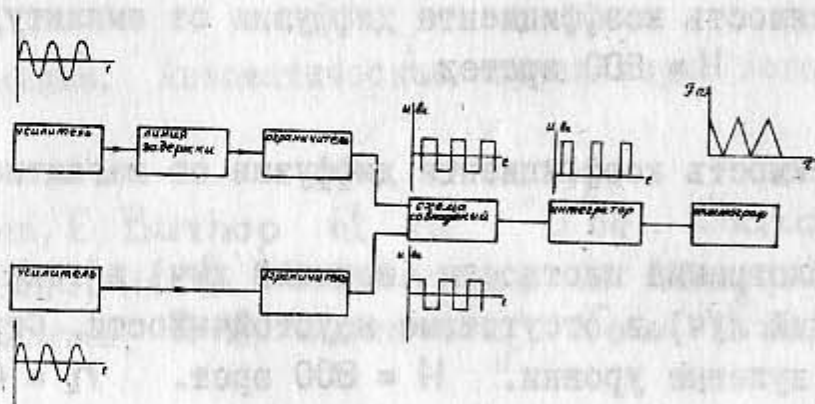


Рис. 2.

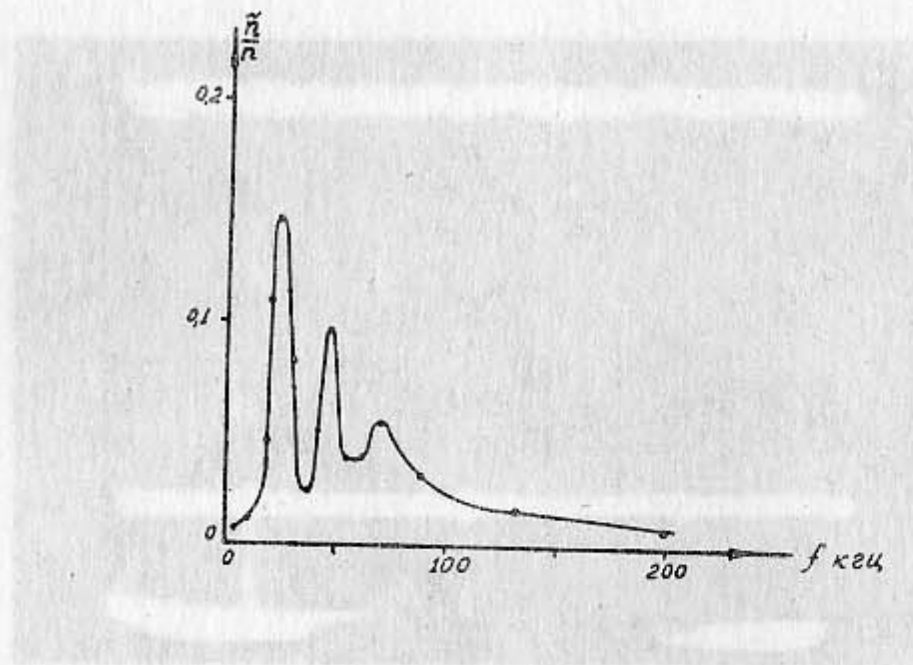


Рис. 3.

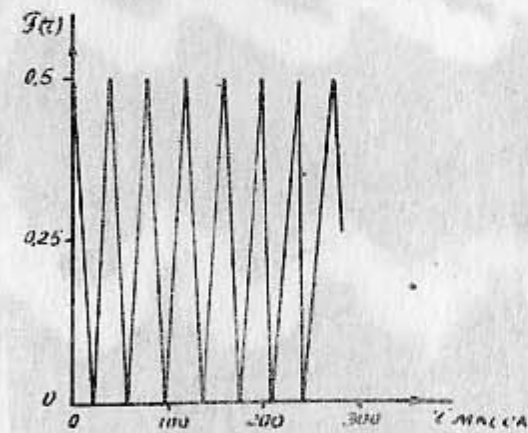
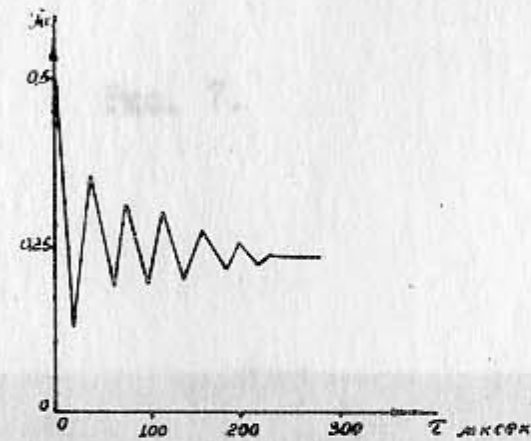


Рис. 4.

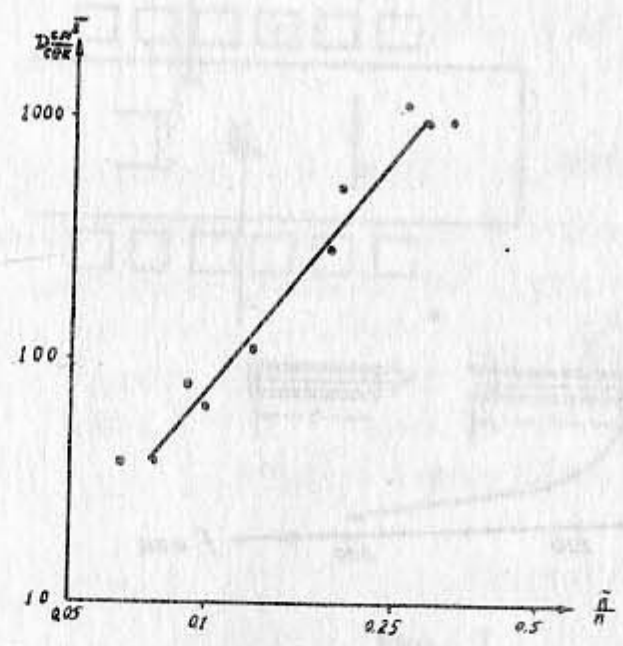


Рис. 5.

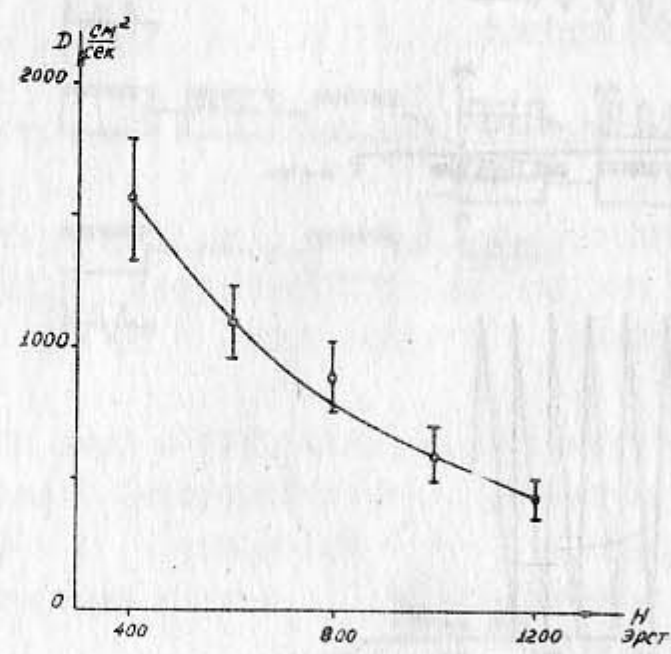


Рис. 6.

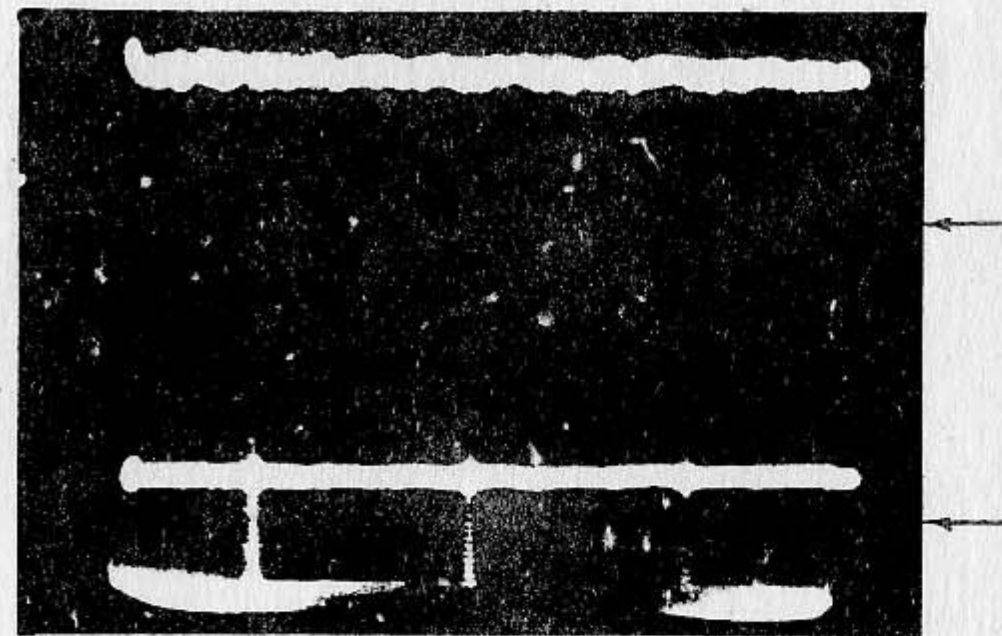


Рис. 7.

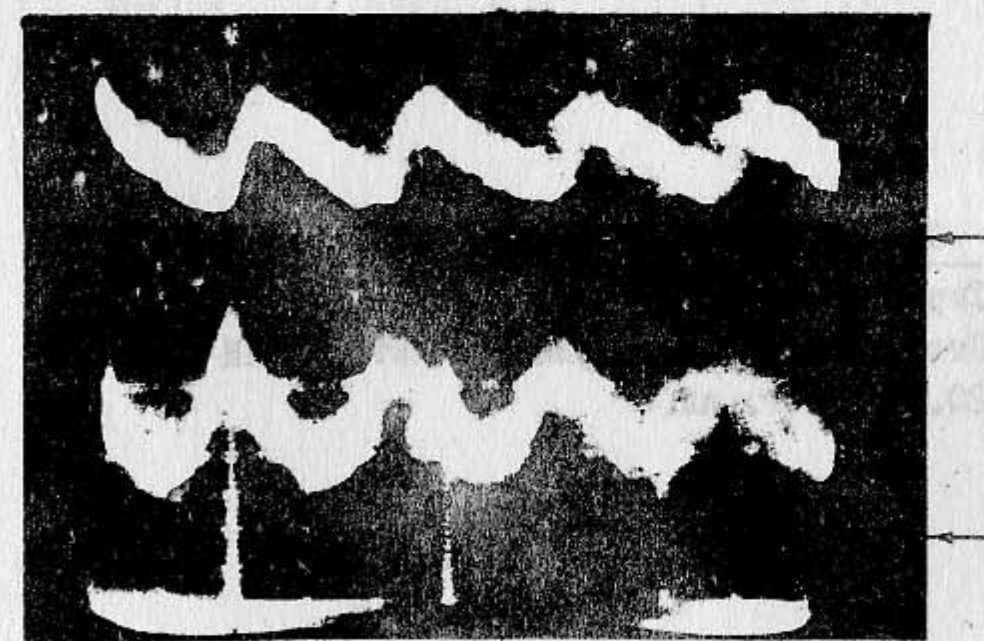


Рис. 8.