



А к а д е м и я н а у к С С С Р
И Н С Т И Т У Т К О С М И Ч Е С К И Х И С С Л Е Д О В А Н И Й

Пр-543

М.А. Грунтман

МЕЗЗВЕЗДНЫЙ ГЕЛИЙ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

М о с к в а

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пр-543

М.А. Грунтман

МЕЖЗВЕЗДНЫЙ ГЕЛИЙ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

Представлено к печати
академиком Г.И.Петровым

1980

Знание характеристик межзвездного газа на орбите Земли может представлять интерес в связи с возможностью его прямой регистрации с помощью детекторов на основе вторичной электронной эмиссии. В настоящей работе приведены результаты численных расчетов характеристик межзвездного гелия в окрестности Земли, обсуждаются некоторые аспекты методики проведения измерений и их интерпретации.

The knowledge of the interstellar gas parameters at the Earth orbit is of interest due to real possibility to detect it by devices on the basis of secondary electron emission. Results of interstellar helium characteristics at terrestrial neighbourhood are presented, few aspects of the experiment technique and interpretation are discussed.

© Издано в ИКИ АН СССР, Москва, 1980 г.

Активные теоретические изыскания и успешные спутниковые эксперименты по измерению фонового излучения неба в резонансных линиях водорода и гелия позволили достичь удовлетворительного качественного понимания взаимодействия нейтрального межзвездного (МЗ) газа (МЗГ) с Солнечной системой (СС). Состояние теории и экспериментальных измерений достаточно полно отражено в ряде обзоров [1, 2, 3, 4]. Трудности, возникающие при интерпретации проводившихся измерений, указывают на целесообразность постановки качественно новых экспериментов. Изучение этого явления представляет, очевидно, значительный интерес не только для астрофизики, но и для понимания некоторых солнечно-земных связей, могущих, при определенных условиях, оказывать заметное влияние на Землю. Такой новый эксперимент может быть в частности основан на прямой регистрации на орбите Земли втекающего в СС потока МЗГ и определении его характеристик. На возможность или желательность подобного эксперимента указывается в ряде работ [3, 5, 7]. Более того, существует сообщение, что такой эксперимент находится в стадии активной подготовки*. В данной работе в обоснование возможности постановки эксперимента такого рода представлены и обсуждаются результаты численных расчетов характеристик потоков МЗГ на орбите Земли и обсуждается их связь с параметрами невозмущенного МЗГ. Сделаны некоторые замечания

* W.I. Axford. Выступление на заседании Ученого совета ИКИ АН СССР 11 апреля 1979г.

относительно методики измерений и интерпретации возможных результатов.

Из астрономических наблюдений известно, что Солнце движется относительно окружающих его звезд со скоростью ~ 20 км/с. Скорость движения МЗГ — того же порядка величины. Возможные значения характеристик невозмущенного нейтрального МЗГ в окрестности Солнца находятся в следующих диапазонах: плотность $n_0 = 0,01 \pm 1,0 \text{ см}^{-3}$, температура $T_0 = 1000 \pm 15000$ К, скорость относительно Солнца $V_0 \approx 20$ км/с. Как полагают МЗГ состоит на $\sim 90\%$ из атомарного водорода и на $\sim 10\%$ из атомов гелия.

Считается, что набегающий на СС поток МЗГ проходит через область ударной волны, которой замыкается сверхзвуковой поток Солнечного ветра (СВ), хотя прямого экспериментального подтверждения существования этой области пока нет. Область ударной волны должна располагаться на расстоянии $R_{\text{ш}} = 50 \pm 150$ а.е. от Солнца [2]. Тот факт, что область активного влияния солнечных гравитационного поля, излучения и плазмы СВ на поток МЗГ находится на расстоянии $R \ll R_{\text{ш}}$ от Солнца, позволяет разделить задачу определения характеристик невозмущенного МЗГ по измерениям в окрестности Земли на две части. Первая — по результатам измерений в окрестности Земли определить параметры МЗГ, прошедшего сквозь область окончания СВ. И вторая — связать полученные параметры с характеристиками невозмущенного МЗГ в окрестности СС. Некоторые аспекты второй части задачи были рассмотрены в [8].

В настоящей работе рассматривается только первая часть задачи. Везде далее индекс 0 (V_0, n_0, T_0) будет указывать на то, что соответствующие значения параметров относятся к прошедшему через ударную волну МЗГ, но находящемуся еще достаточно далеко от области активного взаимодействия с солнечным гравитационным

Учитывая, что для упомянутых плотностей МЗГ длина свободного пробега нейтральных частиц относительно столкновений друг с другом составляет не менее сотни астрономических единиц, атомы МЗГ можно рассматривать несталкивающимися между собой и движущимися независимо друг от друга. На влетающие в СС атомы действуют силы гравитационного притяжения и радиационного отталкивания. При условии, что на интересующих нас расстояниях окружающая Солнце среда оптически тонкая, последняя сила обычно учитывается в виде поправки к гравитационной постоянной G в выражении для силы гравитационного притяжения.

$$G_{\text{эф}} = G(1 - \mu).$$

где μ — отношение радиационной силы к гравитационной. Для МЗ водорода μ зависит от солнечной активности и составляет, по оценкам, $0,4 \pm 1,5$. Для МЗ гелия $\mu \ll 1$. При движении атомов в СС возможна их ионизация солнечным УФ-излучением, перезарядка на ионах СВ, а также упругие столкновения с электронами и ионами СВ — эти процессы также будут изменять характеристики невозмущенного МЗГ.

В каждую точку околосолнечного пространства с координатами (R, θ) приходят два потока атомов МЗГ (рис.1). При температуре набегающего МЗГ $T_0 = 0$ это очевидно. При $T_0 \neq 0$ в каждую точку будут приходить частицы вообще говоря с бесконечного большого числа направлений. В этом случае под траекторией потока будем подразумевать траекторию частицы с нулевой тепловой скоростью. Направление прихода этой частицы в точку (R, θ) будем считать направлением прихода потока атомов МЗГ. Очевидно, что направление прихода частиц с нулевой тепловой скоростью будут находиться в области близкой к направлению прихода потока, причем размер этой области будет определяться величиной температуры T_0 .

Энергия атомов He на орбите Земли примерно на порядок будет превышать энергию атомов H. Кроме того МЗ водорода сильнее конья-

зуется УФ излучением и перезарядкой на протонах СВ чем МЗ гелий. По этим соображениям представляется наиболее удобным непосредственно регистрировать на орбите Земли поток атомов МЗ He. Все дальнейшее рассмотрение посвящено именно потоку МЗ гелия.

На орбите Земли кинетическая энергия атомов МЗ гелия относительно наблюдателя, движущегося вместе с Землей, равна

$$E_{He} = \frac{m_{He} (\vec{V}_{He} - \vec{V}_E)^2}{2},$$

где $V_{He} = \sqrt{V_0^2 + 2 \frac{G_{\text{Солн}} M_{\text{Солн}}}{R_0}}$, \vec{V}_E - скорость орбитального движения Земли в этой точке, m_{He} - масса атома He,

$M_{\text{Солн}}$ - масса Солнца, R_0 - расстояние от Солнца, т.е. 1 а.е.

На рис.2 представлены зависимости от положения на орбите кинетической энергии атомов МЗ гелия относительно наблюдателя, движущегося вместе с Землей. Ввиду малой интенсивности потоков регистрировать нейтральный МЗГ с помощью обычных ионизационных детекторов не представляется возможным. Однако нейтральные частицы с энергией ~ 100 эВ могут быть непосредственно зарегистрированы приборами на основе вторичной электронной эмиссии с эффективностью $0,01+0,1$ [9]. Таким образом представляется возможным детектировать на космическом аппарате на орбите Земли или, скажем, на поверхности Луны, потока атомов МЗ гелия, движущегося навстречу орбитальному движению Земли. Везде в дальнейшем обсуждении, говоря о потоке атомов МЗ гелия на орбите Земли, будем подразумевать именно этот поток. Ввиду его относительно малой интенсивности организовать анализ с целью определения температуры приходящих частиц по величине скоростей, т.е. по энергии, невозможно. Однако анализ по углам прихода частиц, т.е. по скоростям, перпендикулярным движению потока в данной точке как целого, вероятно осуществим.

Приводимые на рис.2 и ниже результаты расчетов ожидаемых характеристик потока получены при следующих предположениях.

а) Орбита Земли - круговая, и радиус орбиты R_0 равен 1 а.е. Действительно, так как эксцентриситет земной орбиты мал ($e = \frac{1}{100}$), то учет его практически не скажется на характере полученных результатов.

б) Вектор скорости набегающего потока МЗГ \vec{V}_0 коллинеарен плоскости эклиптики (хотя из оптических наблюдений и следует, что угол между ними находится в диапазоне $5+20^\circ$). Неколлинеарность приведет к тому, что вместо характеризующего положение наблюдателя на орбите Земли угла θ необходимо будет использовать некий эффективный угол $\theta_{\text{эф}}$. Кроме того направление прихода потока МЗ гелия на небесной сфере будет характеризоваться двумя переменными величинами.

в) Скорость потока МЗГ $V_0 = 20$ км/с. Хаотическое движение частиц в потоке характеризуется максвелловским распределением.

Особенности движения атомов по кеплеровским траекториям в СС достаточно полно рассмотрены в литературе (напр. [1]), и поэтому останавливаться на этом подробно не имеет смысла. Отметим только, следуя работе [1], основные соотношения. Выражение, описывающее траекторию движения атомов, может быть представлено в следующем виде

$$R = \frac{\beta \rho_0^2}{1 + \beta \rho_0 \sin \theta - \cos \theta},$$

где $\beta = \frac{V_0^2}{G_{\text{эф}} M_{\text{Солн}}}$, ρ_0 - прицельный параметр набегающего атома на СС. В каждую точку приходят две траектории и их прицельные параметры определяются как

$$\rho_{0(1,2)} = \pm \frac{R}{2} \sin \theta + \sqrt{\frac{R}{\beta} (1 - \cos \theta) + \frac{R^2}{4} \sin^2 \theta}.$$

Направление прихода частиц в точку (R, θ) принято описывать

радиусом-вектором от Солнца в этой точке - δ . Угол δ равен

$$\delta = \arccos \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{dR}{dt}\right)^2}} \right).$$

Плотность частиц при $T_0=0$ в точке (R, θ) можно получить из соотношения

$$n(R, \theta) = \frac{p_0}{R} \frac{dp_0}{dR} \frac{V_0}{V(R)} \frac{n_0}{\sin \theta \cos \delta}.$$

где $V(R)$ - скорость атомов He на расстоянии R от Солнца. Таким образом для каждой точки, зная скорость \vec{V}_0 набегающих атомов, можно рассчитать направление прихода и плотность потока. Из-за отличия температуры от нуля набегающий поток МЗГ будет характеризоваться дисперсией скоростей, а характеристики потока на орбите Земли (интенсивность потока и температура) будут описываться интегралами по распределению атомов по скоростям в набегающем потоке. Вычисление соответствующих интегралов проводилось с помощью метода Монте-Карло. Как отмечалось выше, возможна организация анализа потока по перпендикулярным скоростям, т.е. измерение эффективной перпендикулярной температуры, определяемой по дисперсии скоростей в данном направлении. Как будет показано, взаимодействие с гравитационным полем приводит к анизотропии температуры. Поэтому в потоке следует рассматривать две перпендикулярные температуры в каждой точке. Одну - T_{\perp} - характерную дисперсию скоростей частиц в потоке в направлении, перпендикулярном траектории, но в одной с ней плоскости. И другую - T_{\parallel} - в направлении, нормальном траектории. Следует подчеркнуть, что для области углов θ , близких к 180° (угловой размер этой области определяется величиной T_0) представляется фактически несправедливым пользоваться введенным понятием температуры. Это становится очевидным из следующих соображений. В точку $\theta \neq 180^\circ$ приходят только две траектории, т.е. только два потока,

каждый из которых может быть охарактеризован соответствующими параметрами. В точку же $\theta = 180^\circ$ приходит бесконечное множество траекторий, и точки прихода частиц на небесной сфере образуют кольцо, ширина которого будет определяться величиной T_0 . По этой причине представленные ниже угловые зависимости характеристики потока обнаруживают разрыв в области углов θ , близких к 180° .

Кроме гравитационного воздействия к нагреву потока МЗ гелия будут приводить упругие столкновения с электронами СВ [10] (этот нагрев будет практически изотропен) и с протонами СВ [6, 7].

Все три источника нагрева (взаимодействие с гравитационным полем Солнца, упругие столкновения с электронами и ионами СВ) МЗ гелия в СС в силу их относительной слабости могут рассматриваться как независимые, а температура, приобретаемая нагревом, аддитивной. Это приближение существенно облегчает рассмотрение задачи.

Представленные ниже результаты расчета температуры гелия, обусловленных взаимодействием с гравитационным полем Солнца, в совокупности с результатами работ по нагреву МЗ He столкновениями, позволят определить характеристики МЗ гелия, возмущенного прохождением через область окончания СВ по данным прямых измерений, выполненных на орбите Земли. На рис.3 приведены результаты расчета зависимости угла между направлением Солнце-Земля и перпендикуляром к направлению траектории потока от положения на орбите Земли для наблюдателя, движущегося вместе с Землей, δ_0 при $V_0 = 20$ км/с. Из такой зависимости, полученной экспериментально, - возможный способ реализации измерений обсуждается ниже, - могут определяться характеристики вектора \vec{V}_0 (величина и направление).

На этом рисунке так же представлена аналогичная зависимость:

$\delta(\theta)$ для гипотетического наблюдателя, покоящегося на орбите Земли.

Заметим, что изменение угла δ не превышает $0,5^\circ$ за сутки, и точность определения угла δ будет определяться только качеством измерительного прибора. Зависимости $|\delta|$ от величины V_0 при различных углах θ представлены на рис.4. Видно, что ошибка определения угла δ в 1° приводит к ошибке определения скорости V_0 в 1 км/с. Отсюда вытекают и соответствующие требования к измерительной аппаратуре.

На рис.5 приведены зависимости перпендикулярных температур T_\perp и T_\parallel на орбите Земли от угла θ для $T_0 = 100$ К и $T_0 = 10000$ К. Видно, что различие между T_\perp и T_\parallel весьма значительное. Очевидно при $\theta = 0^\circ$ $T_\perp = T_\parallel$. Это указывает на возможность определения направления вектора \vec{V}_0 по измерениям температуры и взаимного контроля измерений. Сравнивая экспериментально измеренные величины перпендикулярных температур с рассчитанными можно определить T_0 . На рис.6 представлены зависимости величины T_\perp и T_\parallel при различных θ от величины T_0 . Использование этих зависимостей открывает возможность оценить взаимосвязь ошибок при определении T_0 указанным способом.

На рис.7 представлены зависимости величин T_\perp и T_\parallel от расстояния R от Солнца при различных значениях углов θ . При использовании зависимостей этого типа возможна интерпретация обсуждаемых измерений и при их проведении на межпланетных космических аппаратах, например при полетах к Марсу или Венере.

На рис.8 показана зависимость плотности потока МЗ гелия j от положения наблюдателя на орбите Земли (определяющая потерю атомов He скоростью фотоионизации (скорость перезарядки на протонах СВ значительно меньше) принята равной $0,6 \cdot 10^{-7}$ с $^{-1}$ для расстояния 1 а.е. [2]). Плотность потока j нормирована на ве-

личину плотности потока невозмущенного МЗ $j_0 = n_0 V_0$. Так как j_0 не менее нескольких тысяч частиц на сантиметр квадратный в секунду, и возможно превышает 10^4 см $^{-2}$ с $^{-1}$, то при упомянутой выше эффективности регистрации $0,01 + 0,1$ интенсивность счета полезного сигнала при входной площади детектора равной 1 см 2 будет не менее сотни импульсов в секунду.

Некоторые вопросы методического характера, относящиеся к обсуждаемому эксперименту, уже рассматривались в [5]. Регистрировать атомы МЗ гелия, наиболее удобно с помощью детекторов на основе вторичной электронной эмиссии, например каналовых электронных умножителей (КЭУ) и микроканаловых пластин (МКП). Наличие фонового УФ-излучения является, пожалуй, основным препятствием в использовании этих умножителей для прямой регистрации атомов He. Необходимо существенно снизить чувствительность входных поверхностей умножителей к ультрафиолетовому излучению. Это может быть достигнуто, например, путем использования в качестве входных поверхностей умножителей полупроводящего вещества, прозрачного для ультрафиолета, но сохраняющего достаточный коэффициент вторичной электронной эмиссии для атомов He, например типа LiF.

Угол δ может определяться путем сканирования по углам детектора с узкой диаграммой направленности. Направление прихода — направление, при котором регистрируемый поток атомов МЗ гелия максимален. Температура в потоке также может быть определена из показаний сканирующего узконаправленного детектора. Наличие двух различающихся перпендикулярных температур приводит к необходимости использовать два узконаправленных детектора целевого типа, т.е. с диафрагмой, ограничивающей поток только в одном измерении. Альтернативный способ измерения температуры состоит в установке перед детектором, ориентированным по регистрируемому потоку, спе-

циальным образом устроенной маски, размытие тени от которой будет определяться температурой (перпендикулярной) в потоке. Считывая получаемое изображение, — а здесь весьма перспективным является использование считывания с помощью матриц Адамара (см. например [11]) — определяется температура потока. Длительность обсуждаемого эксперимента должна быть не менее года. Увеличение продолжительности измерений до нескольких лет открывает возможность зарегистрировать и временные изменения параметров МЗ гелия.

В заключении считаю необходимым выразить благодарность проф. В.Б.Леонасу за постановку задачи и за весьма длительные и плодотворные обсуждения, которые сделали возможным выполнение этой работы.

Подпись к рисункам

1. Втекание МЗ гелия в СС. В точку с координатами (R, θ) приходят две траектории потока с соответствующими прицельными расстояниями $R_{0(1)}$ и $R_{0(2)}$. $\vec{V}(R)$ — скорость атомов He в точке (R, θ) , δ — угол между перпендикуляром к вектору $\vec{V}(R)$ и направлением Солнце — точка (R, θ) .
2. Зависимости от положения на орбите кинетической энергии атомов МЗ He для наблюдателя, движущегося вместе с Землей. 1 — для частиц потока (первого), движущегося навстречу Земле; 2 — для частиц другого (второго) потока. $V_0 = 20$ км/с.
3. Зависимости угла между направлением Солнце — Земля и перпендикуляром к вектору скорости потока для неподвижного наблюдателя δ и наблюдателя, движущегося вместе с Землей, δ_v в зависимости от положения на орбите.
4. Зависимости $|\delta|$ от величины скорости V_0 для различных углов θ на орбите Земли.
5. Зависимости температур T_1 и T_n от положения на орбите для различных значений T_0 . $V_0 = 20$ км/с. $R = 1$ а.е.
6. Зависимость температур T_1 и T_n от величины T_0 для различных углов θ . $V_0 = 20$ км/с. $R = 1$ а.е.
7. Зависимости температур T_1 и T_n от расстояния от Солнца для различных углов θ . $V_0 = 20$ км/с.
8. Зависимость интенсивности потока j на орбите Земли в зависимости от положения на орбите. $V_0 = 20$ км/с. $T_0 = 10000$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. H.J.Fahr. *Astroph. and Sp. Sci.*, 1968, 2, 474.
2. W.I.Axford. *NASA SP-308*, 1972, 609.
3. H.J.Fahr. *Sp. Sci. Rev.*, 1974, 15, 483.
4. T.E.Holzer. *Rev. of Geoph. and Sp. Phys.*, 1977, 15, 467.
5. М.А.Грунтман. Московский физико-технический институт.
Дипломная работа, 1977.
6. H.J.Fahr. *Astron. and Astroph.*, 1978, 66, 103.
7. M.K.Wallis, M.H.A.Hassan. *Planet. Sp. Sci.*, 1978, 26, 111.
8. V.B.Baranov, M.G.Lebodev, M.S.Ruderman. *Astroph. and Sp. Sci.*, to be published.
9. A.Katrib, J.-C. Abbe, J.-M.Paulus. *Rev. de Phys. Appliq.*, 1970, 5, 269.
10. F.-M. Wu and D.L.Judge. *Astroph. J.*, 1978, 225, 1045.
11. E.D.Nelson and M.L.Fredman. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, 60, 1664.

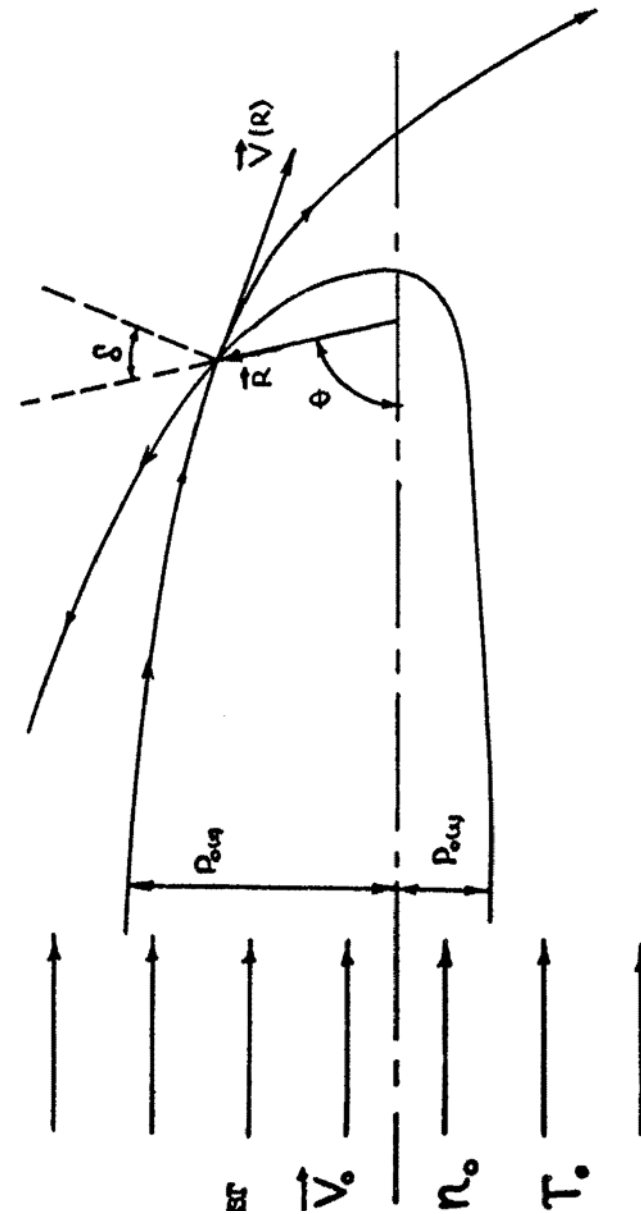


Рис. I

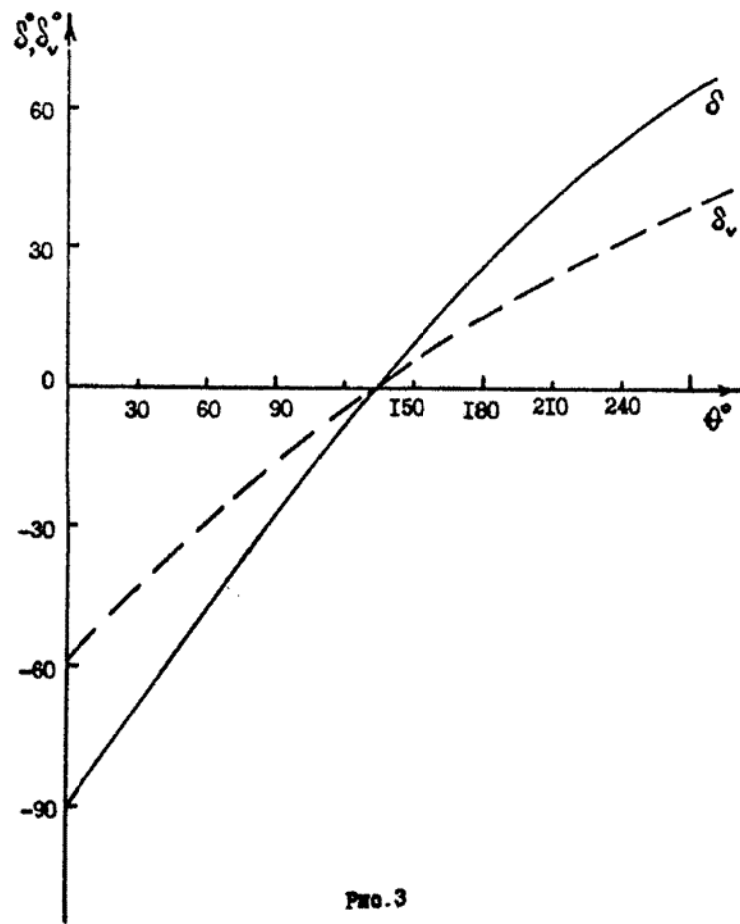
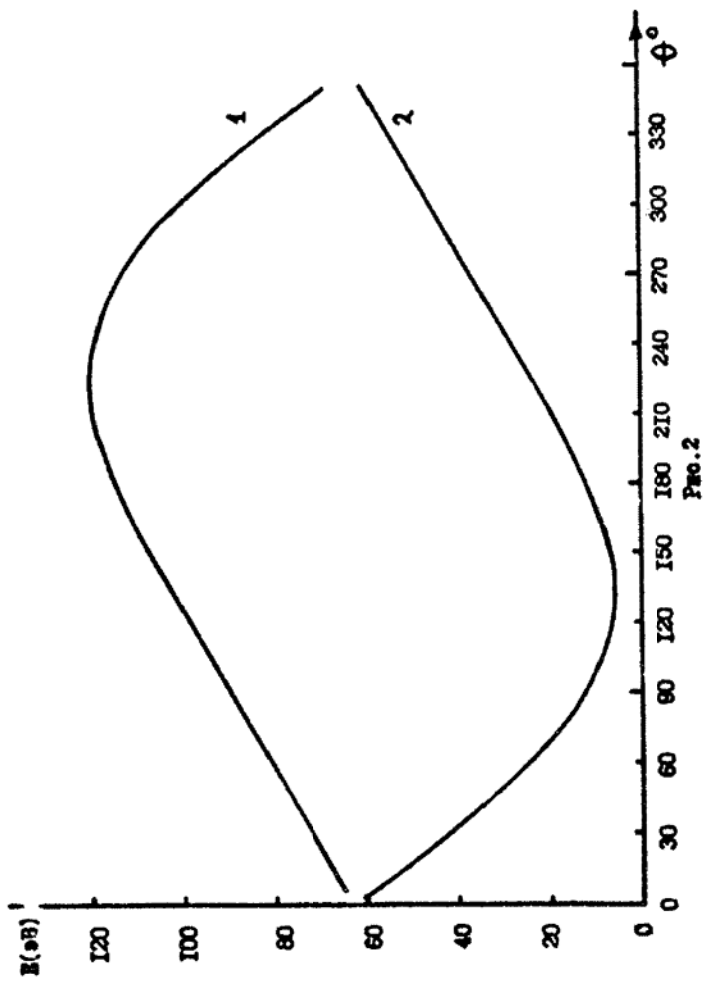


Fig. 3

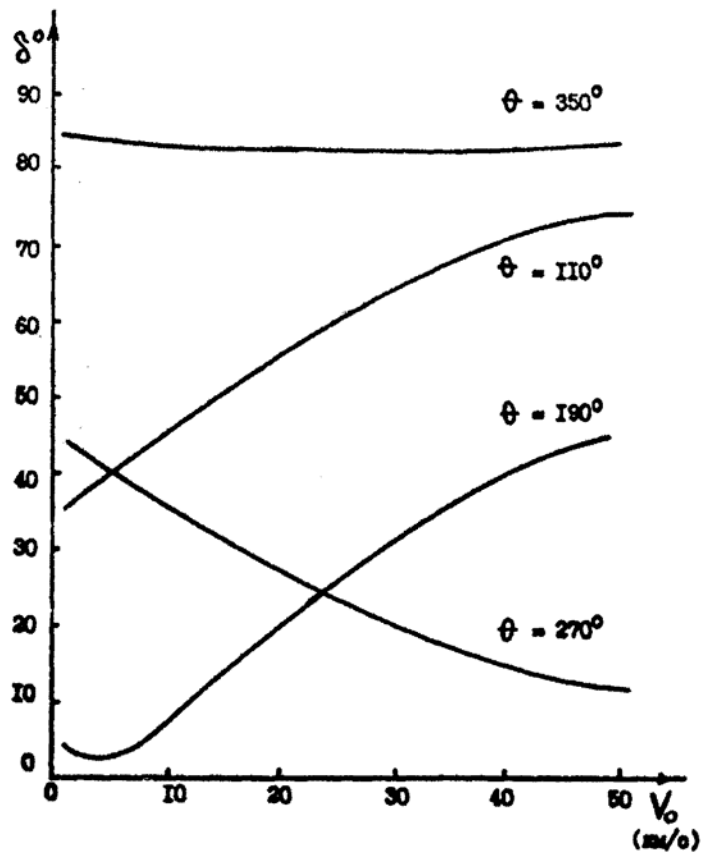


FIG. 4

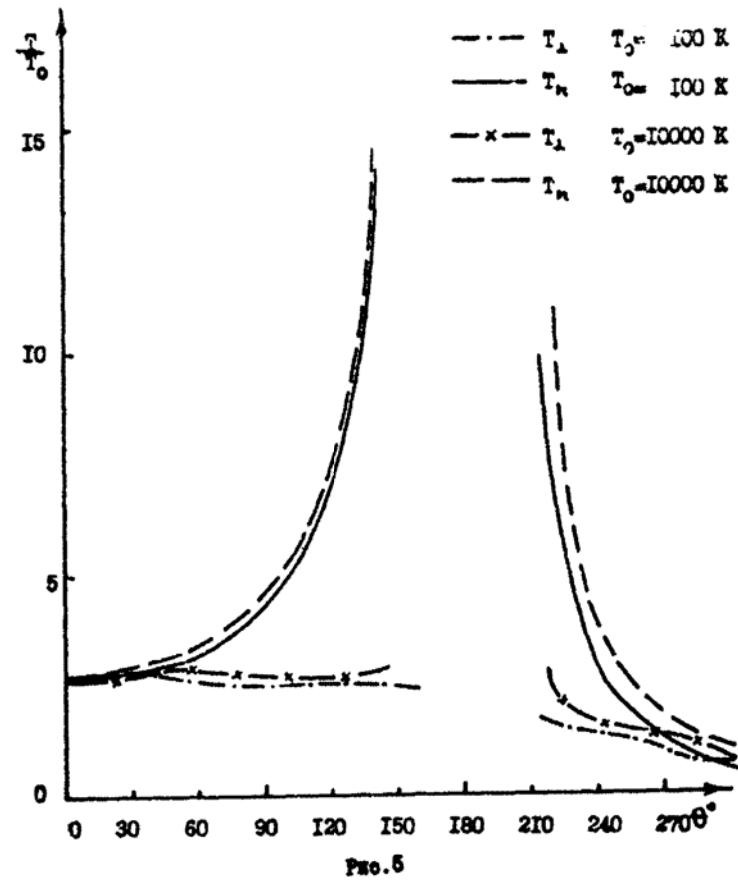


FIG. 5

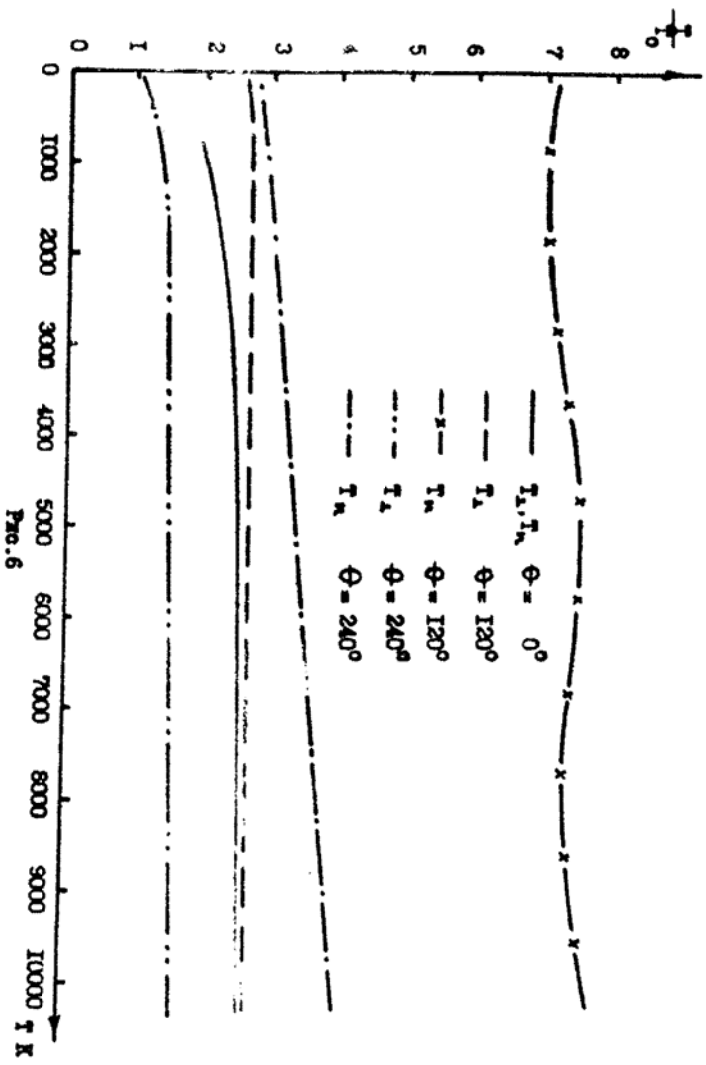


Fig. 6

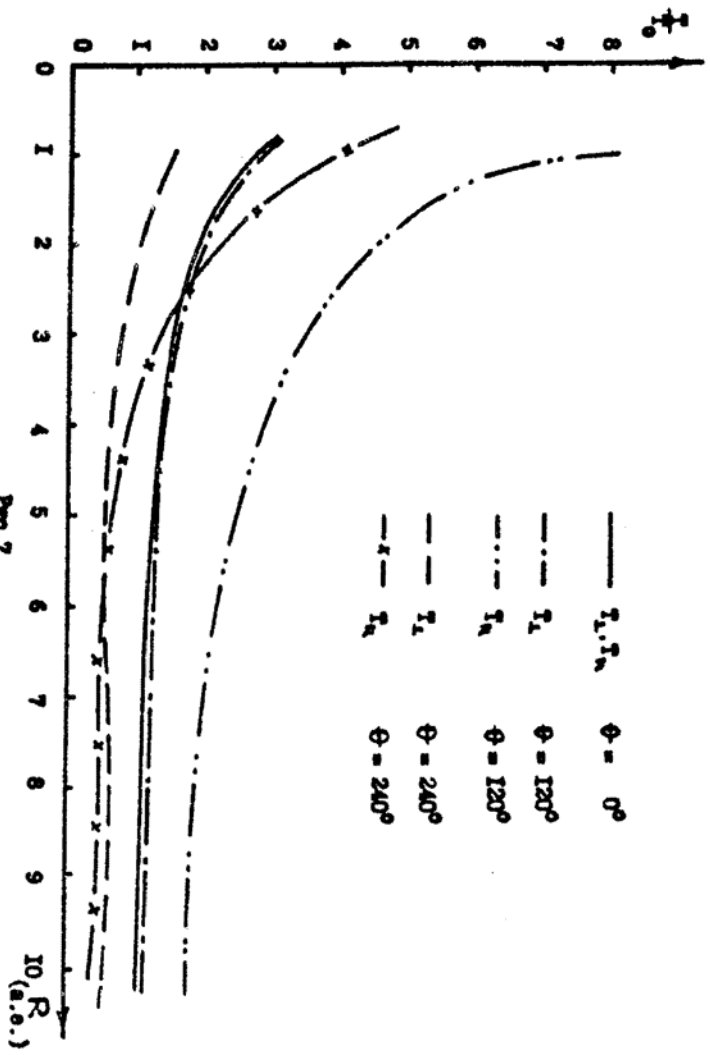


Fig. 7

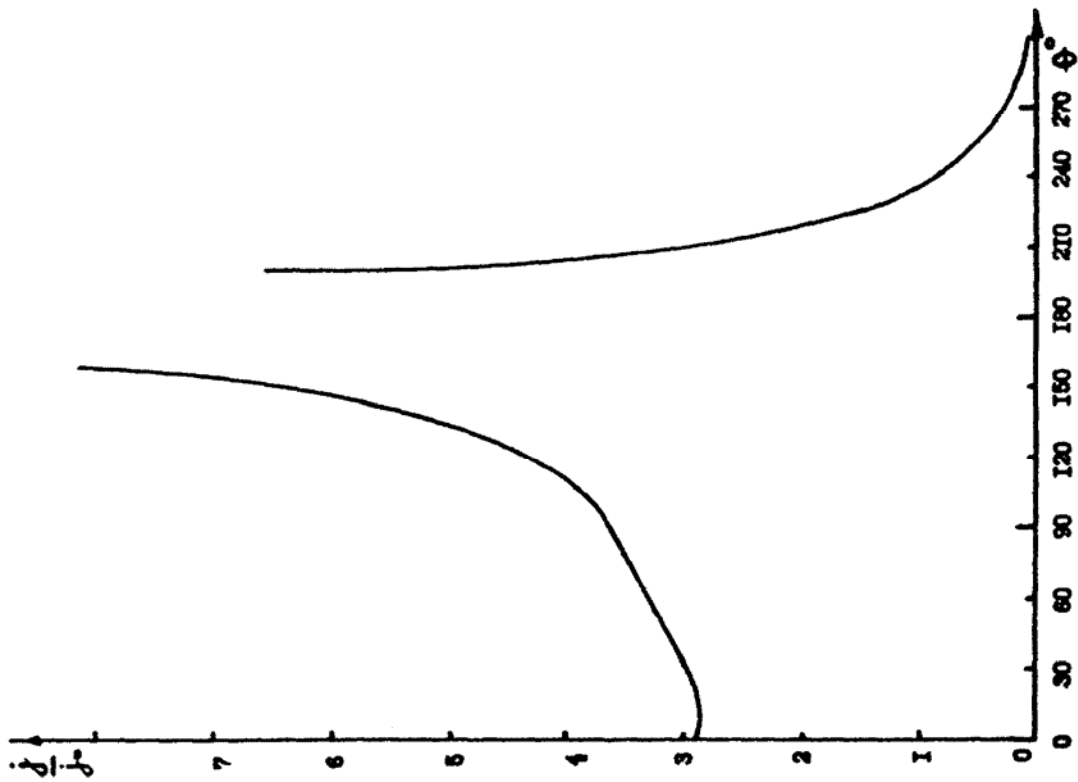


Рис. 8

055(02)2

Ротарный ИЛД АН СССР

Г-21364

Подписано к печати 13.12.79

Заказ 2411

Тираж 80

Объем 1 уч.-изд.л.