

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
АСТРОФИЗИКА

ТОМ 7

ФЕВРАЛЬ, 1971

ВЫПУСК 1

О ДВИЖЕНИИ ГАЗА В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ. II.

Ю. П. КОРОВЯКОВСКИЙ

Поступила 27 января 1970

Пересмотрена 23 марта 1970

Рассчитаны траектории движения газовых потоков в тесных двойных системах звезд U Gem, VV Pup, UX UMa в трехмерном случае с учетом динамических эффектов газового давления. Получены координаты точки встречи газового потока, идущего от спутника, с оболочкой звезды для различных величин и направлений начальных скоростей. Скорость встречи газового потока с оболочкой составляет $500 \div 550$ км/сек для системы UX UMa, $550 \div 600$ км/сек для системы VV Pup и $900 \div 1000$ км/сек для системы U Gem. Делается попытка объяснить различную мощность свечения „горячего пятна“ в системах U Gem, VV Pup, WZ Sge и в системах UX UMa, DQ Her.

В работе [1] приводятся некоторые результаты расчета траекторий движения газовых струй в тесных двойных системах в трехмерном случае с учетом динамических эффектов газового давления, роль которых оценивается в автомодельном приближении. Газовый поток, текущий от спутника, разгоняясь в гравитационном поле главного компонента системы, встречается с оболочкой главной звезды, теряя при этом часть своей кинетической энергии, и в результате столкновения в оболочке образуется локально нагретая область (так называемое „горячее пятно“). Дополнительное излучение, возникающее в этой области, обуславливает появление на кривой блеска двойной системы „горба“ [2].

В [1] были рассчитаны модели газовых потоков и было проведено сравнение вычисленных положений точки встречи потока и оболочки с наблюдаемым положением „горба“ на кривых блеска двойных систем WZ Sge и DQ Her. Как показали расчеты [1], из сравнения наблюдаемого положения „горба“ на кривой блеска с теоретическим положением точки встречи можно оценить соотношение скоростей враще-

ния спутника вокруг своей оси и обращения его вокруг центра масс. Путем численного интегрирования системы уравнений движения находится как величина скорости выброса, необходимая для отрыва вещества от спутника, так и величина скорости газового потока при встрече с оболочкой, которые могут быть использованы для оценок мощности ударной волны, возникающей при встрече газового потока с оболочкой [2].

В связи с этим представляет интерес провести дополнительные расчеты движения газовых потоков для тех тесных двойных систем, на кривых блеска которых присутствуют „горбы“, а именно для систем U Gem, VV Pup, UX UMa. Используя систему уравнений движения, полученных в [1]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d^2x}{d\tau^2} - 2 \frac{dy}{d\tau} &= \frac{\partial C}{\partial x} \\ \frac{d^2y}{d\tau^2} + 2 \frac{dx}{d\tau} &= \frac{\partial C}{\partial y} + Q \frac{y - y_0}{z^2 + (y - y_0)^2} \\ \frac{d^2z}{d\tau^2} &= \frac{\partial C}{\partial z} + Q \frac{z}{z^2 + (y - y_0)^2} \\ \frac{d^2x_0}{d\tau^2} - 2 \frac{dy_0}{d\tau} &= \frac{\partial C}{\partial x} \\ \frac{d^2y_0}{d\tau^2} + 2 \frac{dx_0}{d\tau} &= \frac{\partial C}{\partial y} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где

$$C = \frac{1}{1+q} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{q}{1+q} \frac{1}{\sqrt{(x - a_0)^2 + y^2 + z^2}} + \\ + \left(x - \frac{q}{1+q} \right)^2 + y^2, \\ q = \frac{\mathcal{M}_{гл}}{\mathcal{M}_{кп}}, \quad \tau = \omega_0 t,$$

ω_0 [сек⁻¹] — угловая скорость обращения спутника по орбите, мы провели расчеты траекторий движения газовых потоков для четырех моделей тесных двойных систем. Параметры этих моделей приведены в табл. 1.

Обозначения в табл. 1: $\mathcal{M}_{гл}$ — масса голубого компонента, $\mathcal{M}_{кп}$ — масса красного компонента, q — соотношение масс компонентов системы, a_0 — расстояние между центрами компонентов, $R_{кп}$ — радиус

Таблица 1

Модель	$\Sigma R_{\text{гл}}$	$\Sigma R_{\text{сп}}$	$q = \frac{\Sigma R_{\text{гл}}}{\Sigma R_{\text{сп}}}$	a_0 (см)	$R_{\text{сп}}$ (в долях a_0)	$R_{\text{об}}$ (в долях a_0)	x_{L_1} (в долях a_0)	R_0 (в долях a_0)	T °K	μ	$Q \cdot 10^{-3}$	Обозначение звезды
III	1.20	1.30	0.923	$1.24 \cdot 10^{11}$	0.529	0.25	0.529	0.01	$5 \cdot 10^3$	1	1.43	U Gem [3]
IV	1.20	1.30	0.923	$1.24 \cdot 10^{11}$	0.450	0.25	0.529	0.01	$5 \cdot 10^3$	1	1.43	U Gem [3]
V	0.60	1.30	0.462	$6.20 \cdot 10^{10}$	0.300	0.50	0.600	0.01	10^4	1/2	3.73	VV Pup [4]
VI	1.28	0.77	1.660	$1.26 \cdot 10^{11}$	0.200	0.40	0.448	0.01	10^4	1/2	7.03	UX UMa [5]

спутника в долях a_0 , x_{L_1} — координата точки Лагранжа L_1 , R_{06} — радиус оболочки, вращающейся вокруг главной звезды, T — температура газа в потоке, μ — молекулярный вес, R_0 — начальный радиус газового цилиндра в долях a_0 , Q — член, описывающий эффект газового давления:

$$Q = 2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} A \rho_c^{\gamma-1} \frac{1}{a_0^2 \omega_0^2};$$

A — энтропийная константа и ρ_c — плотность газа на оси симметрии газового цилиндра. Принимаем $\gamma = 5/3$.

Численное интегрирование системы уравнений движения проводилось на ЭЦВМ „БЭСМ 3м“ для пяти точек газового цилиндра А, В, С, Д, Е, которые в момент $\tau = 0$ располагались, как показано на рис. 1в [1].

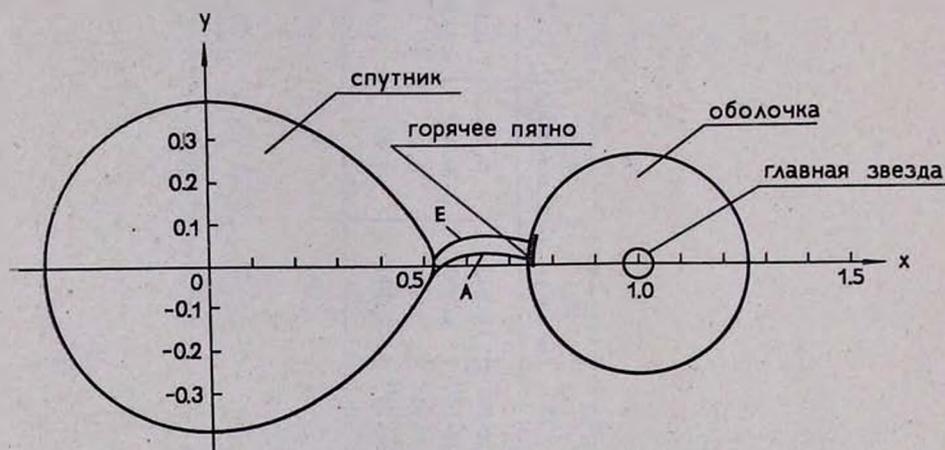


Рис. 1. Траектории точек А и Е в плоскости xu для модели III при начальных скоростях $V_x^0 = 5$ км/сек, $V_y^0 = 160$ км/сек, $V_z^0 = 0$.

В табл. 2 помещены величины начальных скоростей, для которых проводилось численное интегрирование системы уравнений V_x^0 и V_y^0 , координаты x_c и y_c , скорости V_x^c , V_y^c газового потока при встрече с оболочкой, ширина и толщина потока Δu и Δz , время перелета вещества от спутника до встречи с оболочкой $\Delta \tau$.

На рис. 1, 2, 3 нанесены траектории точек А, С, Е, в плоскости xu и xz для моделей III и IV при различных значениях начальной скорости. Модель III отличается от модели IV лишь иным значением

Таблица 2

Модель III (U Gem), единица характерной скорости = 520 км/сек

Вариант расчета	V_x^0 (в ед. характерн. скорости)	V_y^0 (в ед. характерн. скорости)	x_e (в до- лях a_0)	y_c (в до- лях a_0)	V_x^c (в ед. характерн. скорости)	V_y^c (в ед. характерн. скорости)	Δy (в до- лях a_0)	Δx (в до- лях a_0)	Δz ($\Delta z = \omega_0 \Delta t$)
1	0.001	0	0.755	-0.030	1.80	-0.35	0.025	0.020	0.3
2	0.004	0.004	0.750	-0.035	2.00	-0.30	0.030	0.020	—
3	0.005	0	0.760	-0.050	2.00	-0.30	0.025	0.018	—
4	0.010	0	0.750	-0.040	1.90	-0.30	0.025	0.020	0.3
5	0.010	0.010	0.750	-0.040	2.00	-0.30	0.030	0.020	—
6	0.010	-0.010	0.760	-0.045	2.00	-0.30	0.025	0.020	—
7	0.010	-0.040	0.750	-0.025	2.00	-0.29	0.020	0.015	—
8	0.010	0.300	0.750	+0.035	2.00	-0.30	0.035	0.020	—
9	0.020	0.020	0.760	-0.032	2.00	-0.30	0.020	0.020	—
10	0.030	0	0.750	-0.040	2.05	-0.30	0.020	0.020	—
11	0.060	0	0.760	-0.045	2.00	-0.30	0.015	0.015	—
12	0.100	0	0.755	-0.040	2.00	-0.30	0.030	0.020	—
13	0.200	0	0.750	-0.050	2.05	-0.31	0.020	0.020	—
14	0.300	0	0.750	-0.040	2.00	-0.30	0.020	0.020	—
15	0.400	0	0.750	-0.035	2.00	-0.25	0.030	0.020	—

Модель IV (U Gem), единица характерной скорости = 520 км/сек

1	0.001	0	0.765	-0.080	1.95	-0.300	0.040	0.020	—
2	0.010	0	0.760	-0.080	2.00	-0.300	0.040	0.020	0.44
3	0.050	0	0.770	-0.090	1.90	-0.320	0.040	0.020	—
4	0.100	0	0.760	-0.065	2.10	-0.360	0.042	0.020	—
5	0.300	0	0.765	-0.075	2.00	-0.420	0.030	0.020	0.36

Модель V (VV Pup), единица характерной скорости = 650 км/сек

1	0.010	0	0.510	-0.082	0.750	-0.390	0.088	0.080	0.68
2	0.010	0.20	0.500	+0.030	0.800	-0.340	0.070	0.070	0.55
3	0.050	0	0.510	-0.080	0.770	-0.350	0.085	0.080	0.61
4	0.200	0	0.500	-0.065	0.790	-0.350	0.065	0.060	0.45
5	0.300	0	0.500	-0.060	0.820	-0.360	0.060	0.050	0.39
6	0.400	0	0.500	-0.055	0.870	-0.365	0.050	0.040	0.34
7	0.500	0	0.500	-0.050	0.900	-0.420	0.050	0.040	0.30

Таблица 2 (продолжение)

Модель VI (UX UMa), единица характерной скорости = 470 км/сек

1*	0.01	0	—	—	—	—	—	—	—
2*	0.05	0	—	—	—	—	—	—	—
3	0.30	0	0.68	-0.24	1.17	-0.43	0.19	0.15	1.00
4	0.40	0	0.68	-0.24	1.20	-0.49	0.18	0.14	0.82
5	0.50	0	0.68	-0.24	1.26	-0.54	0.18	0.12	0.70
6	0.30	+0.30	0.60	-0.03	1.20	-0.58	0.14	0.13	0.69
7	0.30	-0.30	0.83	-0.64	1.18	+0.08	—	0.07	1.84
8	0.30	+0.10	0.64	-0.18	—	—	0.20	0.15	—
9	0.40	+0.20	0.60	-0.08	—	—	0.15	0.12	—

* Точка падает обратно на поверхность спутника.

величины радиуса спутника. В модели III принято, что спутник заполняет полость Роша и истечение вещества происходит из точки L_1 ($x_0 = x_{L_1}$), а в модели IV точка выброса отстоит от точки L_1 на

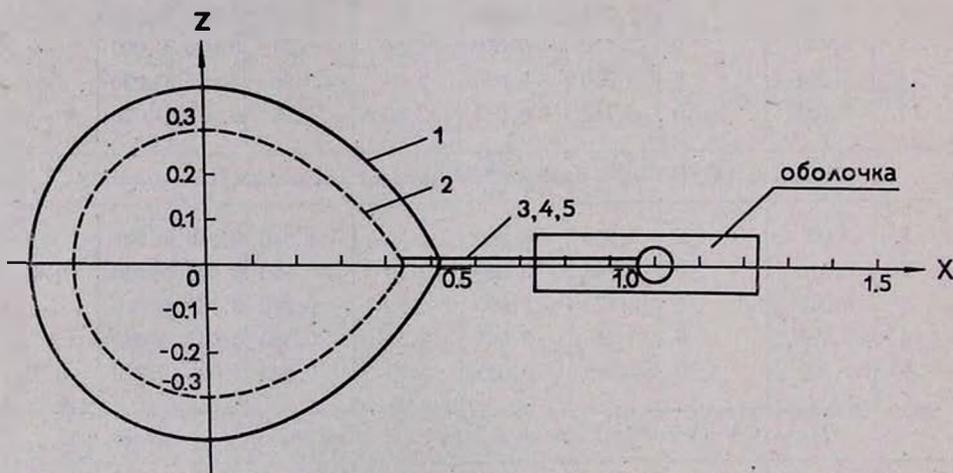


Рис. 2. Траектория точек С в плоскости xz для моделей III и IV: 1—спутник в модели III; 2—спутник в модели IV; 3—при $V_x^0 = 5$ км/сек, $V_y^0 = V_z^0 = 0$; 4—при $V_x^0 = 0.5$ км/сек, $V_y^0 = V_z^0 = 0$; 5—при $V_x^0 = 5$ км/сек, $V_y^0 = 160$ км/сек, $V_z^0 = 0$.

величину $\Delta x = 0.079 \cdot a_0$. Несмотря на это различие, скорость отрыва вещества в модели III и в модели IV оказывается одного порядка и составляет несколько сотен метров в секунду (0.5–1.0 км/сек).

Скорость встречи потока с оболочкой в моделях III и IV, как это следует из табл. 2, заключена в пределах $900 + 1000$ км/сек, и при соударении потока с оболочкой образуется сильная ударная волна, све-

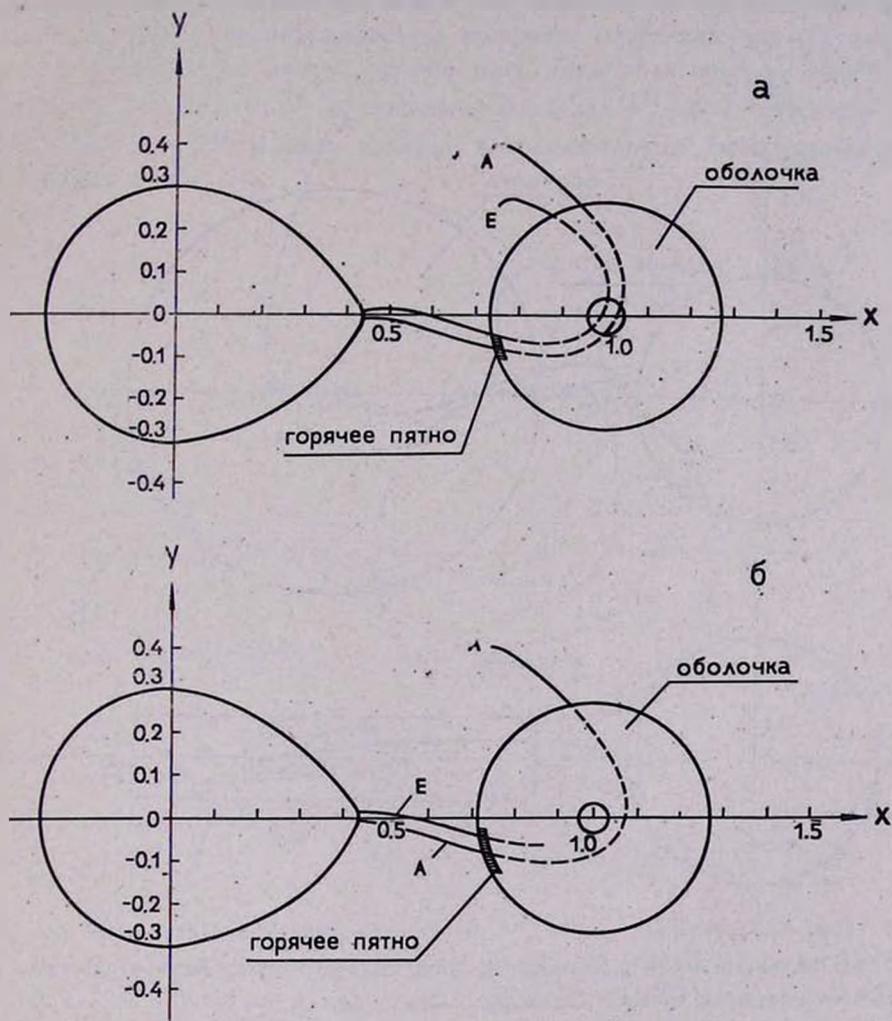


Рис. 3. Траектории точек А и Е в плоскости xy для модели IV. а—при начальных скоростях $V_x^0=0.5$ км/сек, $V_y^0=V_z^0=0$; б—при начальных скоростях $V_x^0=5$ км/сек, $V_y^0=V_z^0=0$.

чение за фронтом которой обуславливает появление „горба“ на кривой блеска. Параметры моделей III и IV были взяты близкими к элементам орбиты звезды U Gem [3].

На рис. 4 и 5 даны траектории точек А, С и Е в плоскостях xu (4а, 5а) и xz (4б и 5б) для модели V при различной по величине и направлению скорости выброса. Следует отметить, что скорость отрыва вещества для модели V лежит в пределах $V_x^0 = 6 \div 10$ км/сек,

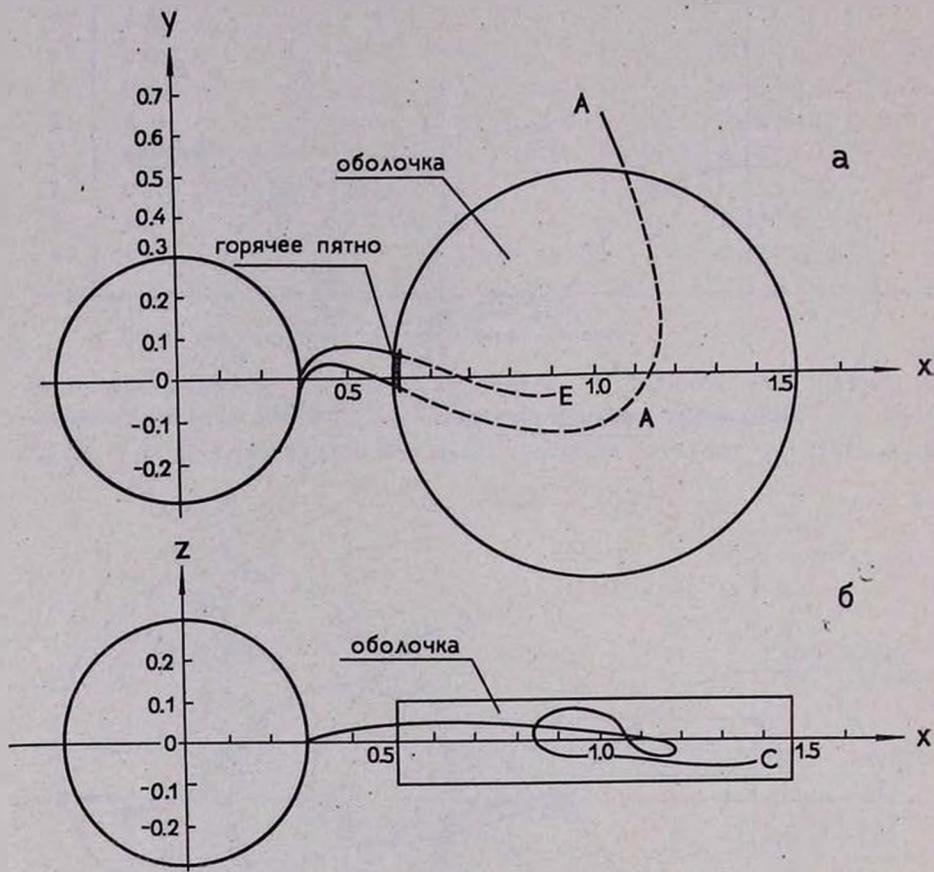


Рис. 4. Траектории точек А, С и Е для модели V при начальных скоростях $V_x^0=6.5$ км/сек, $V_y^0=130$ км/сек, $V_z^0=0$; а—траектории точек А, Е в плоскости xu ; б—траектория точки С в плоскости xz .

несмотря на то, что в данной модели спутник не заполняет внутреннюю полость Роша. Поэтому, если на поверхности спутника вещество имеет небольшую величину скорости (тепловые движения атомов или приливные возмущения), то оно может свободно перетекать к оболочке главной звезды.

Параметры модели V близки к элементам орбиты тесной двойной системы VV Pup [4]. Из сравнения положения точки встречи потока

и оболочки в модели V с наблюдаемым положением „горба“ на кривой блеска этой системы можно заключить, что их совпадение достигается в случае, когда $V_x^0 = 6$ км/сек, $V_y^0 = 60$ км/сек. По-видимому, в системе VV Pup мы имеем дело, как и в случае системы WZ Sge (модель II, [1]), с несинхронностью вращения спутника вокруг своей оси и обращения его вокруг центра масс. Скорости встречи потока с оболочкой для модели V заключены в пределах $V_x^* = 550 + 600$ км/сек, $V_y^* = -200 + -250$ км/сек, и перед встречей поток имеет уплощенную форму (табл. 2).

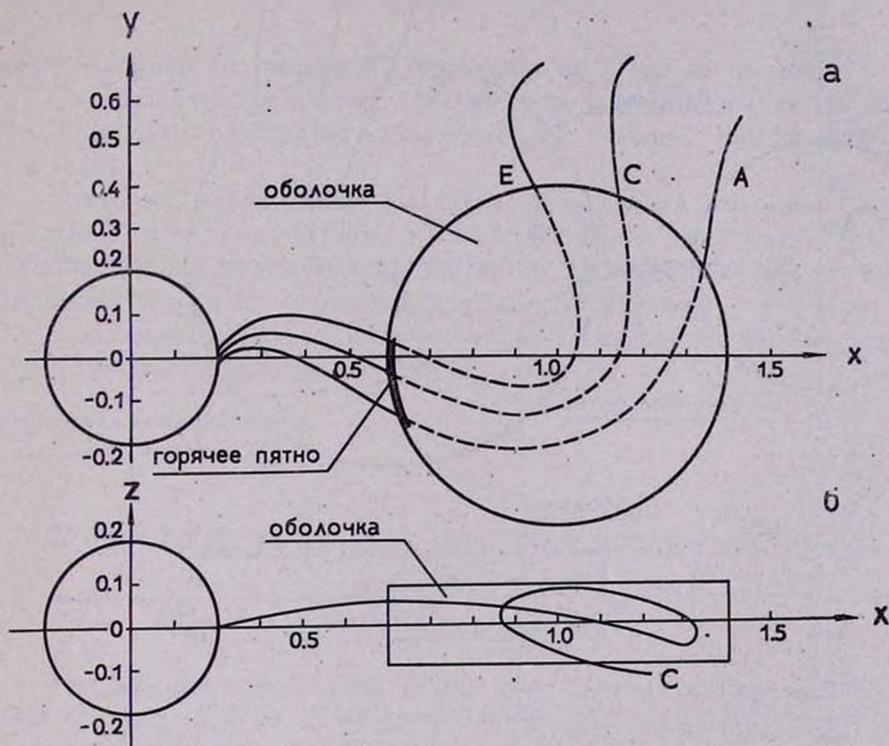


Рис. 5. Траектории точек А, С, Е, для модели V при начальных скоростях $V_x^0 = 130$ км/сек, $V_y^0 = V_z^0 = 0$; а—траектории точек А, С, Е в плоскости $xу$; б—траектория точки С в плоскости xz .

На рис. 6 приведены траектории точек А, С, Е в плоскостях $xу$ (6а) и xz (6б) для модели VI. В модели VI значение минимальной скорости, при которой возможен отрыв вещества из точки $(R_{сп}, 0, 0)$, лежит в пределах $V_x^0 = 100 + 120$ км/сек, а скорости потока при встрече с оболочкой составляют $V_x^* = 500 + 550$ км/сек и $V_y^* = -200$ км/сек и почти не зависят от скорости выброса.

Как следует из расчетов, часть вещества, не попавшая в оболочку, летит по направлению движения главной звезды, и если в точке выброса существует некоторая дисперсия скоростей по величине и направлению, это вещество делает форму оболочки вокруг главной звезды несимметричной, вытянутой в направлении движения главной звезды. Несимметричная форма оболочки может сказаться в изменении интенсивности эмиссионных линий в различных элонгациях.

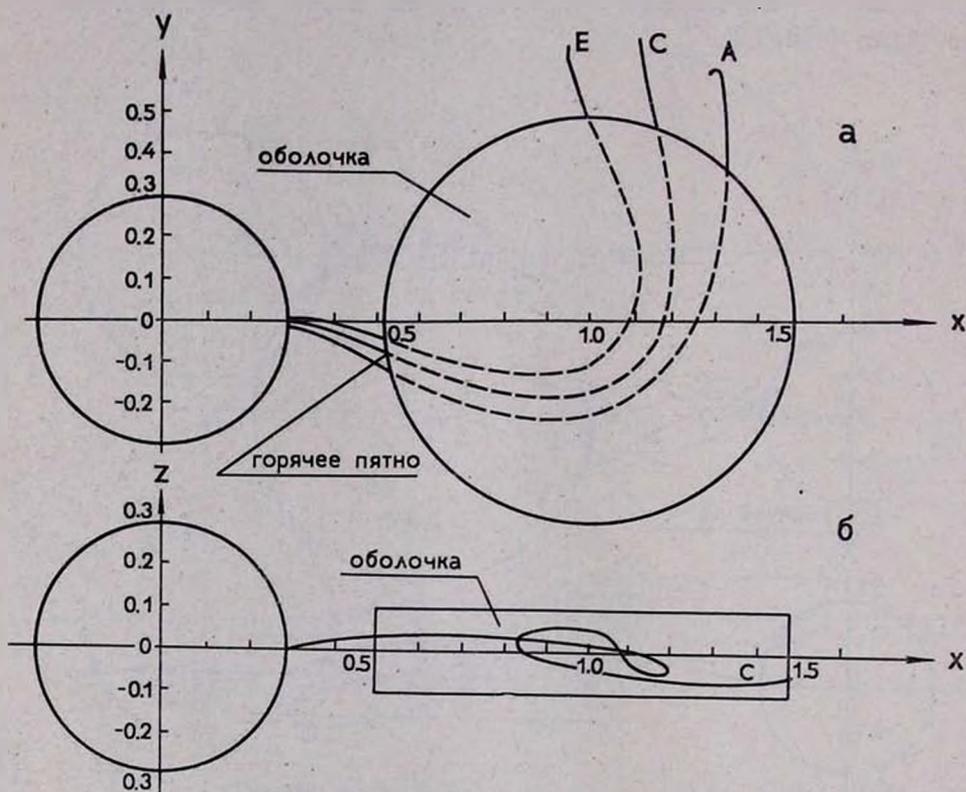


Рис. 6. Траектории точек А, С, Е для модели VI при начальных скоростях $V_x^0=140$ км/сек, $V_y^0=140$ км/сек, $V_z^0=0$; а—траектории точек А, С, Е в плоскости xy ; б—траектория точки С в плоскости xz .

Из табл. 2 следует, что скорости отрыва вещества от спутника в моделях III, IV, V, а также в ранее рассмотренной в [1] модели I, оказываются близкими к тепловой скорости движения атомов на поверхности звезды ($1 \div 10$ км/сек), в то время, как скорости отрыва вещества в моделях VI и II из [1] значительно больше и составляют $100 + 150$ км/сек. Вследствие этого мощность газового потока в пер-

вых трех моделях будет существенно выше, чем в моделях VI и II, так как на поверхности спутника большее количество вещества обладает скоростью порядка 2—10 км/сек, и меньшее — скоростью 100—150 км/сек. Вместе с тем, скорости встречи газового потока с оболочкой в моделях III, IV, V и I [1] превосходят скорости в моделях VI и II из [1] (см. табл. 2). Энергия свечения разогретой области, как известно [2], пропорциональна кинетической энергии падающего на оболочку потока и равна

$$E_{\text{св}} \approx \frac{1}{2} E_{\text{кин}} = \frac{1}{4} m v_{\text{всп}}^2, \quad (3)$$

где m — количество вещества, падающего за 1 сек на оболочку.

Следовательно, в первых трех моделях и в модели I из [1] мощность свечения разогретой области будет больше, чем в моделях VI и II [1].

Возможно, наблюдаемые различия в мощности свечения „горячего пятна“ в системах U Gem, VV Pup, WZ Sge и в системах DQ Her, UX UMa (в предположении равенства их светимостей) могут быть объяснены, исходя из приведенных выше соображений.

В заключение выражаю глубокую благодарность В. М. Арестенко за помощь при обработке числового материала.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

ON THE MOTION OF GAS IN CLOSE BINARY SYSTEMS

Yu. P. KOROVYAKOVSKY

The trajectory movement of the gas streams in close binary systems of stars U Gem, VV Pup, UX UMa were calculated in a three-dimensional case, dynamic effects being taken into account. The coordinates of the point of encounter of the gas-stream, coming from the satellite with the envelope of the star is obtained for different amounts and directions of initial velocities. The velocity of the encounter of the gas stream with the envelope is 500—550 km/sec for UX UMa system 550—600 km/sec for VV Pup system and 900—1000 km/sec for U Gem system. Attempts have been made to explain the different power of luminosity of the „Hot spot“ in the systems U Gem, VV Pup, WZ Sge and in the systems UX UMa, DQ Her.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ю. П. Коровяковский, *Астрофизика*, 5, 67, 1969.
2. В. Г. Горбачкий, *Астрофизика*, 3, 246, 1967.
3. W. Krzeminski, *Ap. J.*, 142, 1051, 1965.
4. G. H. Herbig, *Ap. J.*, 132, 76, 1960.
5. П. П. Паренато, *ПЗ*, 7, 196, 1950.