

УДК: 520.85

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТМЕННОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ VW ЛЕБЕДЯ

К.А.АНТОНЮК¹, Э.А.АНТОХИНА²

Поступила 24 марта 2004

Принята к печати 7 июля 2004

В работе приводятся результаты пятицветной *UBVRI*-фотометрии и поляриметрии затменной двойной системы VW Суг. Показано, что в главном минимуме продолжается ослабление блеска (в коротковолновой области) и после прохождения второго контакта. Этот факт интерпретирован как одно из свидетельств наличия в системе газовых структур. Факт обмена веществом между компонентами системы подтверждается также и зависимостью *O-C*, для построения которой были использованы данные, охватывающие почти сто лет. Анализ поляриметрии позволил разделить собственную ($P=0.30 \pm 0.02$) и межзвездную компоненты поляризации. Было проведено решение *UBVRI*-кривых блеска VW Суг. Оно проводилось с использованием алгоритма синтеза теоретических кривых блеска в модели Роша. Получено хорошее согласие теоретических кривых с наблюдениями в фильтрах *V, R, I*; наблюдаемые глубины минимумов в фильтрах *U, B* больше теоретических. Видимо, это связано с влиянием имеющихся в системе газовых потоков.

1. *Введение.* Затменная двойная VW Суг (HD 228545, MWC 1008, $\alpha_{2000} = 20^{\text{h}}15^{\text{m}}12^{\text{s}}.3$, $\delta_{2000} = +34^{\circ}30'48''$) была открыта Вильямсом в 1906г. [1]. Затем ее исследовал Нейланд [2] с целью получения фотометрических элементов. Спектроскопические наблюдения были выполнены Струве [3]. Он показал, что яркий компонент является звездой Главной последовательности спектрального класса A3. Позже проводились фотоэлектрические наблюдения за объектом. Кривая блеска была решена методом Рассела. Предполагалось, что второй компонент системы - звезда G5. Однако по различным причинам результаты, полученные разными авторами, сильно отличаются [4,5]. Кривая блеска переменной имеет главный и вторичный минимумы, которые обусловлены взаимными затмениями компонентов. Кроме того, вид кривой блеска осложняется присутствием в системе газовых структур.

2. *Наблюдения.* Фотоэлектрические и поляриметрические *UBVRI*-наблюдения VW Суг проводились на 1.25-м зеркальном телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории с помощью финского двухлучевого модулирующего фотометра-поляриметра конструкции В.Пииролы [6]. Всего было получено 12 тысяч оценок блеска и 1500 оценок поляризации в течение 37 ночей. Наблюдения проводились в период с 2001г. по 2003г. Ошибка оценки блеска была в пределах $\pm 0^{\text{m}}.02$. В качестве звезды сравнения использовалась звезда с координатами

$\alpha_{2000} = 20^{\text{h}}15^{\text{m}}19^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = +34^{\circ}35'12''$, для которой нами были получены величины $UBVRI$, равные соответственно $10^{\text{m}}.72$, $10^{\text{m}}.87$, $10^{\text{m}}.66$, $10^{\text{m}}.40$, $10^{\text{m}}.25$, определенные привязкой к фотометрическим стандартам в системе Джонсона. Для учета инструментальной составляющей поляризации проводились регулярные измерения стандартов с большой и малой поляризацией.

В главном минимуме происходит полное затмение. Из рис.1 видно, что после начала фазы полного затмения продолжает наблюдаться дальнейшее ослабление блеска. Этот эффект заметен только в синих полосах. Анализ внезатменной части кривой блеска показывает отсутствие

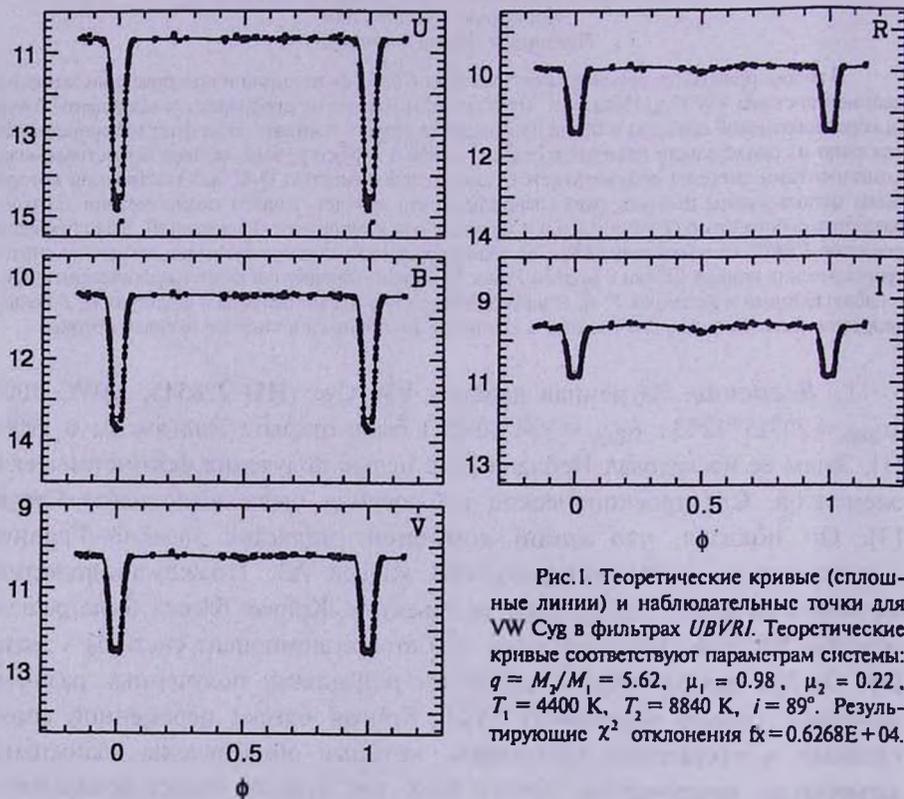


Рис.1. Теоретические кривые (сплошные линии) и наблюдательные точки для VW Cyg в фильтрах $UBVRI$. Теоретические кривые соответствуют параметрам системы: $q = M_2/M_1 = 5.62$, $\mu_1 = 0.98$, $\mu_2 = 0.22$, $T_1 = 4400$ К, $T_2 = 8840$ К, $i = 89^\circ$. Результирующие χ^2 отклонения $\text{fx} = 0.6268\text{E} + 04$.

вторичного минимума в полосах U и B . Его глубина в V не превышает $0^{\text{m}}.08$. В полосах R и I его глубина становится значительной. Кроме того, если в синих полосах внезатменная часть кривой блеска плоская, то в полосах R и I заметна эллипсоидальность звезды. Это обусловлено заметным вкладом в общий блеск системы блеска субгиганта, заполняющего свою полость Роша.

Зависимость показателей цвета показана на рис.2. Видно, что вторичный компонент имеет более поздний спектральный класс, чем

предполагалось ранее (G5) и относится, скорее всего, к К-субгигантам.

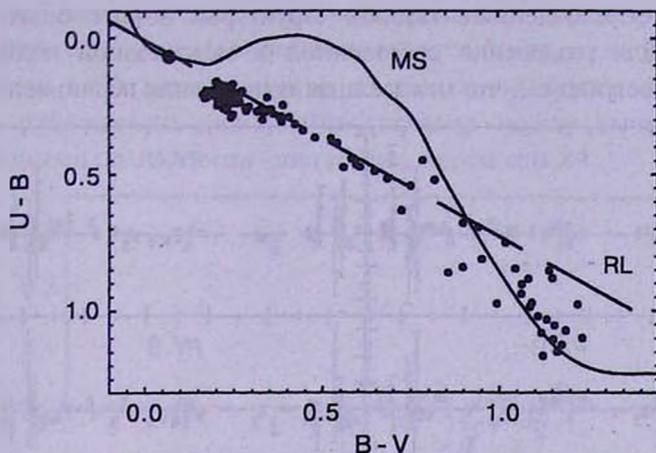


Рис.2. Зависимость показателей цвета $(B - V) - (U - B)$ в различных состояниях блеска. Сплошная линия соответствует Главной последовательности, а пунктирная - линии покраснения.

Для построения диаграммы O-C (рис.3) были использованы все доступные из литературы данные. Видно, что наши наблюдения (закрашенный кружок) хорошо дополняют результаты других авторов. Кривая O-C показывает сложную переменность во времени, что может быть обусловлено интенсивными газовыми потоками в системе.

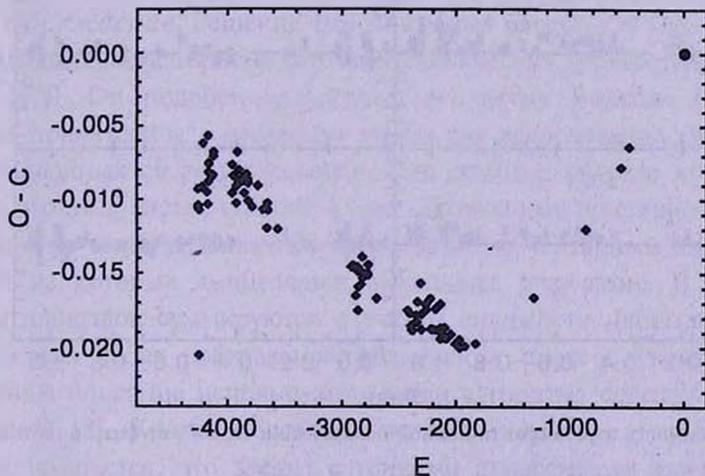


Рис.3. Зависимость O - C.

3. *Результаты.* Усредненный результат поляриметрических наблюдений показан на рис.4. Из графика видно различие поляризации в фазах, соответствующих затмению и внезатменной части. Рост поляризации в момент минимума обусловлен эффектом контраста - возрастанием вклада рассеянного на оптически тонком газе поляризованного излучения. На

кривой прослеживаются отдельные детали, возникающие в области главного минимума и обусловленные газовой структурой вокруг более яркого компонента. Для разделения собственной и межзвездной поляризации прежде всего постулируем, что межзвездная поляризация подчиняется закону

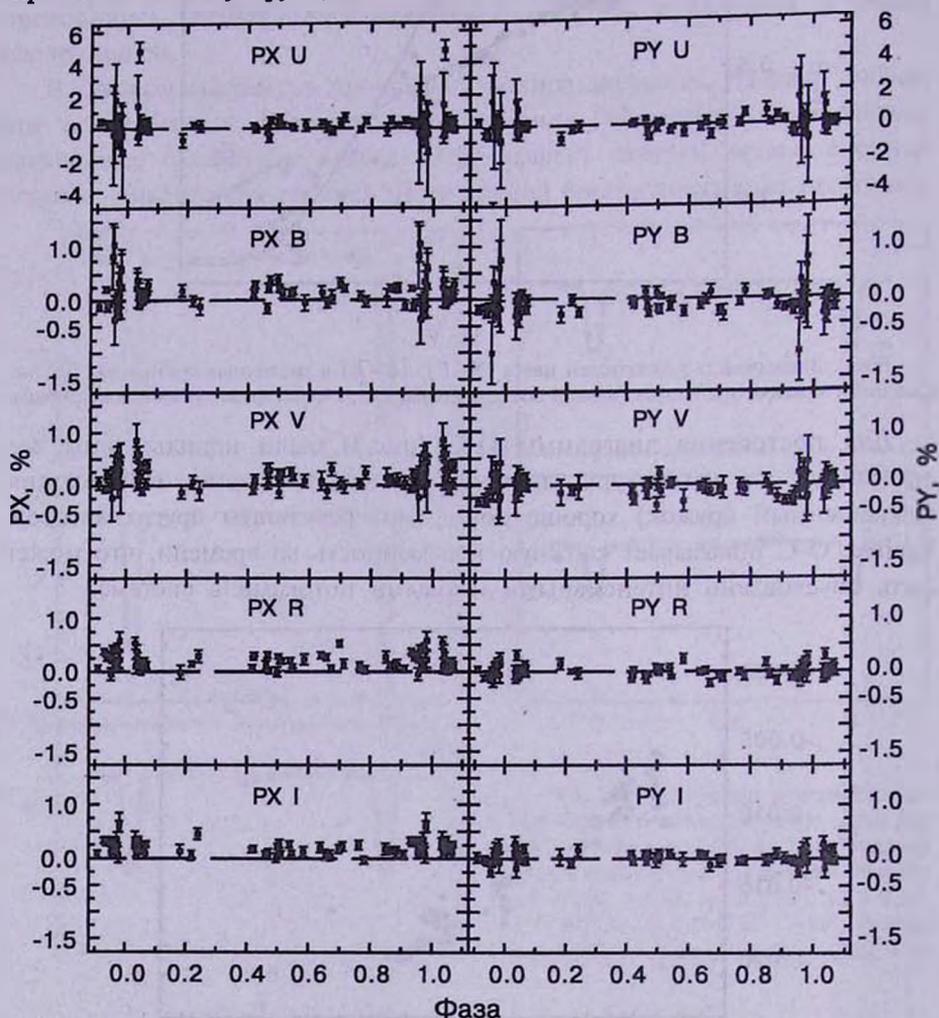


Рис.4. Зависимость параметров линейной поляризации P_x и P_y от фазы в пяти цветах.

Серковского. Также будем считать, что собственная поляризация возникает в оптически тонкой водородной плазме в результате электронного рассеяния и, следовательно, она не зависит от длины волны. При этом подбираем такие параметры межзвездной поляризации (положение максимума, степень поляризации и позиционный угол), чтобы векторная сумма собственной и межзвездной поляризации наилучшим образом удовлетворяла наблюдениям во всех пяти полосах. В результате были получены следующие значения

для собственной поляризации системы: $P = 0.30 \pm 0.02$ и $PA = 26^\circ \pm 2^\circ$.

На рис.5 показана диаграмма нормированных параметров Стокса q и u для наблюдаемой (закрашенные кружки), межзвездной (P'), собственной (P^*) поляризации и их векторной суммы (P_c). Учитывая ошибки наблюдений видно, что согласие между вычисленными и наблюдаемыми значениями достаточно хорошее.

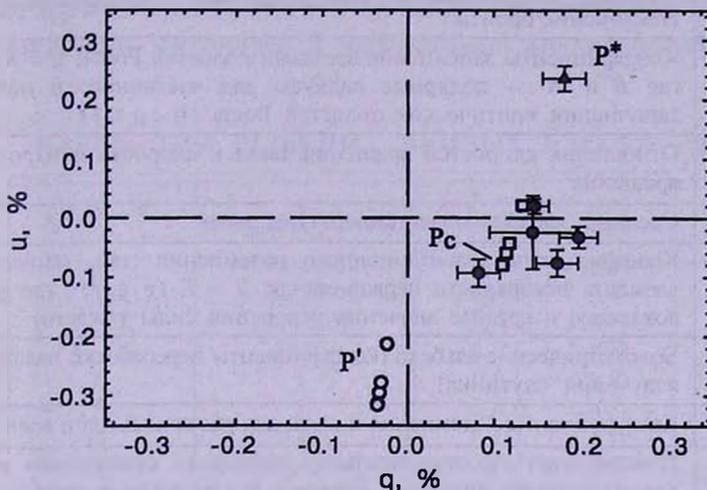


Рис.5. Диаграмма нормированных параметров стокса q и u .

4. Обсуждение. Решение *UBVRI*-кривых блеска VW Cyg проводилось с использованием алгоритма синтеза теоретических кривых блеска в модели Роша [7,8]. Он подобен известному алгоритму Вилсона [9], который широко применяется в настоящее время для исследования кривых блеска тесных двойных систем. Основная идея методов синтеза кривых блеска тесных двойных систем состоит в том, что сложные приливно-искаженные поверхности звезд разбиваются на тысячи элементарных площадок, для каждой из которых вычисляется выходящее излучение. В дальнейшем вклады площадок суммируются с учетом видимости площадок на звезде в различных фазах орбитального периода, а также с учетом затмений. Подробное описание используемого нами алгоритма содержится в работе Антохиной [8]. Кратко напомним основы модели.

Предполагается, что звезды с тонкими атмосферами движутся вокруг общего центра масс системы по эллиптическим орбитам (в случае VW Cyg рассматривается частный случай круговой орбиты). Форма каждой звезды описывается эквипотенциальной поверхностью в модели Роша. Учитываются эффекты гравитационного потемнения, потемнения к краю, а также эффект прогрева атмосферы звезды падающим излучением спутника (эффект "отражения"). Входные параметры задачи синтеза теоретических кривых блеска тесной двойной системы в модели Роша перечислены в табл.1.

**ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММЫ СИНТЕЗА
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ БЛЕСКА ДЛЯ ДВОЙНОЙ
СИСТЕМЫ С КРУГОВОЙ ОРБИТОЙ**

$q = M_2/M_1$	Отношение масс звезд
i	Наклонение орбиты
μ_1, μ_2	Коэффициенты заполнения звездами полостей Роша, $\mu = R/R^*$, где R и R^* - полярные радиусы для частичного и полного заполнения критических полостей Роша ($0 < \mu \leq 1$)
F_1, F_2	Отношения скоростей вращения звезд к скорости синхронного вращения
T_1, T_2	Средние эффективные температуры звезд
β_1, β_2	Коэффициенты гравитационного потемнения (так, температура элемента поверхности первой звезды $T = T_1 \cdot (g/g_0)^{\beta_1}$, где g, g_0 - локальное и среднее значения ускорения силы тяжести)
A_1, A_2	Болометрические альбедо (коэффициенты переработки падающего излучения спутника)
$u_1(n), u_2(n)$	Коэффициенты потемнения к краю для различных длин волн $\lambda(n)$
$l_3(n)$	"Третий свет" в относительных единицах суммарного монохроматического потока от системы для различных длин волн
$\lambda(n)$	Эффективные длины волн теоретических кривых блеска

Часть параметров может быть зафиксирована с учетом имеющейся информации о системе. В соответствии с данными Милано и др. [4], выполнившими анализ кривых блеска VW Cyg в двух фильтрах B, V мы зафиксировали температуру горячей АЗ-звезды ($T_2 = 8840$ К) и значение отношения масс в системе $q = M_2/M_1 = 5.62$. Для коэффициентов гравитационного потемнения взяты стандартные значения для звезд с конвективными оболочками и с лучистым переносом энергии - для холодной звезды $\beta_1 = 0.08$, для горячей звезды $\beta_2 = 0.25$. Коэффициенты "отражения" $A_1 = 0.5$ и $A_2 = 1.0$ для холодной и горячей звезд соответственно. Коэффициенты потемнения к краю выбирались в зависимости от длины волны фильтра [10]. Считалось, что звезды вращаются синхронно со своим орбитальным обращением ($F_1 = F_2 = 1$), и в системе отсутствует "третий свет".

Параметрами поиска являлись: угол наклона орбиты i , коэффициенты заполнения звездами полостей Роша μ_1, μ_2 , температура холодной звезды T_1 . Наилучшее положение теоретических кривых блеска относительно наблюдаемых точек по оси звездных величин определялось отдельно для каждого из пяти фильтров. Теоретические кривые блеска сравнивались с наблюдениями с использованием критерия χ^2 . Поиск

решения проводился одновременно для 5 фильтров. Для нахождения решения обратной задачи использовался известный алгоритм "Simplex" - метод Нелдера-Мида поиска минимума функции по деформируемому многограннику [11,12].

В табл.2 приводятся параметры решения *UBVRI*-кривых блеска VW Cyg и доверительные интервалы параметров поиска по критерию χ^2 на уровне значимости 1%. На рис.1 приведены теоретические кривые блеска для наилучших параметров и наблюдаемые кривые блеска.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ РЕШЕНИЯ КРИВЫХ БЛЕСКА VW Cyg

$q = M_2/M_1$	5.62	$L_1/(L_1 + L_2)(U)$	0.040
i	$89^\circ \pm 0.3^\circ$	$L_2/(L_1 + L_2)(U)$	0.960
μ_1	0.98 ± 0.01	$L_1/(L_1 + L_2)(B)$	0.090
μ_2	0.22 ± 0.01	$L_2/(L_1 + L_2)(B)$	0.910
T_1, K	4400 ± 50	$L_1/(L_1 + L_2)(V)$	0.171
T_2, K	8840	$L_2/(L_1 + L_2)(V)$	0.829
F_1	1	$L_1/(L_1 + L_2)(R)$	0.287
F_2	1	$L_2/(L_1 + L_2)(R)$	0.713
β_1	0.08	$L_1/(L_1 + L_2)(I)$	0.386
β_2	0.25	$L_2/(L_1 + L_2)(I)$	0.614
A_1	0.5	$u_1(U)$	1.00
A_2	1	$u_2(U)$	0.41
$r_1(\text{pole})$	0.2206	$u_1(B)$	1.00
$r_1(\text{point})$	0.2883	$u_2(B)$	0.56
$r_1(\text{side})$	0.2289	$u_1(V)$	0.86
$r_1(\text{back})$	0.2574	$u_2(V)$	0.47
$r_2(\text{pole})$	0.1091	$u_1(R)$	0.67
$r_2(\text{point})$	0.1092	$u_2(R)$	0.38
$r_2(\text{side})$	0.1091	$u_1(I)$	0.55
$r_2(\text{back})$	0.1092	$u_2(I)$	0.30

Полученные параметры системы свидетельствуют, что более горячая и массивная звезда A3 имеет малый радиус и находится глубоко внутри своей полости Роша, в то время как проэволюционировавшая холодная и в настоящее время менее массивная звезда близка к заполнению своей полости Роша. Наклонение орбиты i близко к 90° . В главном минимуме происходит полное затмение горячей звезды. Из анализа кривых блеска можно сделать заключение, что не удастся для одних и тех же параметров модели описать наблюдательные кривые для всех пяти цветов одновременно. При хорошем согласии теоретических кривых с наблюдениями в фильтрах V, R, I наблюдаемые глубины минимумов в фильтрах U, B больше теоретических. Видимо, это связано с влиянием имеющихся в системе газовых потоков.

5. *Заключение.* Для затменной двойной VW Cyg был получен обширный наблюдательный материал, который позволил сделать ряд выводов. Получены надежные фотоэлектрические кривые блеска в пяти цветах, которые показали, что амплитуда переменности максимальна в полосе U и убывает при продвижении в длинноволновую область. Показано, что в главном минимуме продолжается ослабление блеска (в коротковолновой области) и после прохождения второго контакта. Этот факт интерпретирован как одно из свидетельств наличия в системе газовых структур. Факт обмена веществом между компонентами системы подтверждается также и зависимостью $O-C$, для построения которой были использованы данные, охватывающие почти сто лет.

Анализ поляриметрии позволил сделать вывод, что значения поляризации на фазах, соответствующих главному минимуму, и внезатменных частях различаются. Изменения поляризации на фазах главного минимума обусловлены эффектом контраста - возрастанием вклада рассеянного на оптически тонком газе поляризованного излучения. Удалось разделить собственную ($P=0.30 \pm 0.02$) и межзвездную компоненты поляризации.

Выполнено решение *UBFRI*-кривых блеска VW Cyg. Оно проводилось с использованием алгоритма синтеза теоретических кривых блеска в модели Роша. Получено хорошее согласие теоретических кривых с наблюдениями в фильтрах V , R , I ; наблюдаемые глубины минимумов в фильтрах U , B больше теоретических. Видимо, это связано с влиянием имеющихся в системе газовых потоков.

Э.А.Антохина благодарит за финансовую поддержку Российский Фонд Фундаментальных Исследований (грант N 02-02-17524)

¹ Крымская астрофизическая обсерватория,
Украина, e-mail: antoniuk@crao.crimea.ua

² Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга,
Россия, e-mail: elant@sai.msu.ru

MODELING OF THE ECLIPSING BINARY SYSTEM VW CYGNI

K.A.ANTONYUK¹, E.A.ANTOKHINA²

UBVRI photometry and polarimetry of the eclipsing binary system VW Cygni are presented. It is shown that in the main minimum a weakening of brightness (in short-wave area) is been lasting and after the passing of

second contact. This fact is interpreted as one of the evidences of a gas structure presence in the system. The fact of matter exchange between the system components is confirmed by O-C dependence as well, for the building which were used data covering nearly one hundred years. The polarimetric analysis offered to separate the intrinsic ($P = 0.30 \pm 0.02$) and interstellar polarization components. *UBVRI* light curves were solved. For the solution an algorithm of theoretical light curves syntheses in Roche model is used. It was received a good agreement of the theoretical light curves with the observations in *V*, *R*, *I* band. The observable minimum depths in *U*, *B* band are more than theoretical. Evidently this is connected with the influence of existing of a gas flow in the system.

Key words: (*stars*): *eclipsing* - *stars: individual: VW Cygni*

ЛИТЕРАТУРА

1. *A.S.Williams*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 66, 118, 1906.
2. *A.A.Nijland*, Bull. Astron. Inst. Netherl., 2, 128, 1924.
3. *O.Struve*, Astrophys. J., 103, 76, 1946.
4. *L.Milano*, *G.Russo*, *S.Marcozzi*, *A.Dorsi*, Astrophys. Space Sci., 82, 189, 1982.
5. *H.M.Al-Naimiy*, *O.Al-Sikab Assem*, Astrophys. Space Sci., 82, 189, 1982.
6. *T.Korhonen*, *V.Piirola*, ESO Messenger, 1984.
7. *Э.А.Антохина*, Астрон. ж., 65, 1164, 1988.
8. *Э.А.Антохина*, Астрон. ж., 73, 532, 1996.
9. *R.E.Wilson*, Astrophys. J., 234, 1034, 1979.
10. *H.M.Al-Naimiy*, Astrophys. Space. Sci., 53, 181, 1978.
11. *Д.Химмельблау*, Прикладное нелинейное программирование, Мир, М., 1975, с.163.
12. *J.Kallrath*, *A.P.Linnell*, Astrophys. J., 313, 346, 1987.