

ЭВОЛЮЦИЯ И ПУЛЬСАЦИИ POST-AGB ЗВЕЗД НАСЕЛЕНИЯ I

© 2019 г. Ю. А. Фадеев*

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.; после доработки 11.06.2019 г.; принята к публикации 25.06.2019 г.

Проведены расчеты эволюции звезд населения I с начальной массой $M_0 = 1 M_\odot$, $1.5 M_\odot$ и $2 M_\odot$ до стадии предшественника планетарной туманности. Отдельные модели эволюционных последовательностей на стадии post-AGB с эффективными температурами $3.6 \times 10^3 \text{ K} \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 2 \times 10^4 \text{ K}$ были использованы в качестве начальных условий при расчете самовозбуждающихся звездных пульсаций. Впервые на основе совместного решения уравнений радиационной гидродинамики и нестационарной конвекции построены последовательности гидродинамических моделей пульсирующих post-AGB звезд. В рассмотренном интервале эффективных температур пульсации post-AGB звезд обусловлены неустойчивостью фундаментальной моды, а период колебаний сокращается от $\Pi \approx 300$ сут до нескольких суток. Нелинейность радиальных пульсаций является главной причиной нестабильности периода колебаний, которая наиболее велика при эффективных температурах $T_{\text{eff}} < 5000 \text{ K}$. Амплитуда изменения болометрического блеска $\Delta M_{\text{bol}} \approx 1$ зв. вел. характерна для post-AGB звезд при $T_{\text{eff}} \lesssim 6000 \text{ K}$ и быстро убывает с дальнейшим ростом T_{eff} . Полученная в результате расчетов теоретическая зависимость периода пульсаций от эффективной температуры может быть использована как критерий принадлежности наблюдаемой пульсирующей переменной к post-AGB звездам.

Ключевые слова: звезды — переменные и пекулярные.

DOI: 10.1134/S0320010819080023

ВВЕДЕНИЕ

В звездах с солнечным химическим составом и массой на главной последовательности $M_0 \lesssim 9 M_\odot$ завершение эволюционной стадии красного гиганта связано с потерей значительной части водородной оболочки вследствие интенсивного звездного ветра. Звезда покидает асимптотическую ветвь гигантов (AGB) и на диаграмме Герцшпрунга–Рессела (ГР) перемещается при приблизительно неизменной светимости в область ядер планетарных туманностей с эффективными температурами $T_{\text{eff}} \sim 10^5 \text{ K}$. Предположение о взаимосвязи красных гигантов и ядер планетарных туманностей было высказано Шкловским (1956) и позднее подтверждено результатами расчетов звездной эволюции (Пачинский, 1971; Шонбернер, 1979; 1981; Вуд, Фолкнер, 1986; Вассилиадис, Вуд, 1994; Блокер, 1995; Вайс, Фергюсон, 2009; Миллер Бертолами, 2016).

Образование непрозрачной газопылевой оболочки вокруг звезды, находящейся на вершине AGB, существенно ограничивает возможности оптических наблюдений, поэтому эволюционный переход звезды в стадию post-AGB остается недо-

статочно хорошо изученным. По всей видимости, основной причиной интенсивного звездного ветра является динамическая неустойчивость внешних слоев звезды, возникающая вследствие радиальных звездных пульсаций (Тухман и др., 1978). Таким образом, наблюдаемые в post-AGB звездах избытки инфракрасного излучения (Вольк, Квок, 1989; Гривняк и др., 1989; 1994; Иконникова и др., 2018) указывают на присутствие в околосредной среде пылевых частиц, которые образовались на предшествующей стадии эволюции.

Фотометрическая переменность, обусловленная звездными пульсациями, характерна для всех post-AGB звезд. Периоды изменения блеска составляют от нескольких десятков суток (Архипова и др., 2010; Гривняк и др., 2015, 2018) до ≈ 200 сут (Архипова и др., 2009; 2016; Иконникова и др., 2018). Более того, переменная AI CMi с периодом изменения блеска $\Pi \approx 310$ сут по всей видимости также принадлежит к звездам post-AGB и находится в начале этой эволюционной стадии (Архипова и др., 2017). Общей особенностью фотометрической переменности post-AGB звезд является отсутствие строгой периодичности, что в значительной степени затрудняет определение периода изменения блеска.

*Электронный адрес: fadeyev@inasan.ru

Таблица 1. Характеристики эволюционных моделей звезд в начальной точке стадии post-AGB

M_0/M_\odot	$t_*, 10^9$ лет	M_*/M_\odot	$M_{CO,*}/M_\odot$	L_*/L_\odot	$T_{\text{эф},*}, \text{K}$	$\Delta t_{\text{ev}}, \text{лет}$
1.0	12.607	0.542	0.493	3322	3707	7485
1.5	3.040	0.590	0.550	5971	3678	1077
2.0	1.352	0.615	0.581	8169	3620	342

post-AGB звезды находятся на поздней стадии эволюции, поэтому при сопоставлении наблюдательных данных с результатами эволюционных расчетов нередко возникают трудности, связанные с неопределенностями, присущими самой теории (например, скорость потери массы на стадии AGB). Большой ясности в понимании природы этих объектов можно достигнуть с привлечением теории звездных пульсаций. Результаты линейного анализа пульсационной неустойчивости приводятся в работах Залевски (1985, 1993) и Готши (1993), в которых показано, что на диаграмме ГР область радиальных колебаний post-AGB звезд простирается до эффективных температур $T_{\text{эф}} \approx 10^4$ К. Однако необходимо иметь в виду, что при характерных для post-AGB звезд значениях отношения светимости к массе ($L/M \sim 10^4 L_\odot/M_\odot$) низкая плотность газа и малые значения показателя адиабаты в зонах ионизации водорода и гелия предполагают значительную нелинейность колебаний. Результаты гидродинамических расчетов показывают, что радиальные пульсации маломассивных сверхгигантов промежуточных спектральных классов характеризуются большой амплитудой, а нелинейность колебаний является основной причиной отсутствия строгой периодичности (Фадеев, Тутуков, 1981; Фадеев, 1982, 1984; Айкава, 1985а,б, 1991, 1993; Фокин и др., 2001). К сожалению, во всех проведенных ранее гидродинамических расчетах предполагалось, что перенос энергии в оболочке пульсирующей звезды происходит за счет излучения, а конвекция не учитывалась. Вместе с тем роль конвекции в динамике звездных пульсаций становится важной при эффективной температуре звезды $T_{\text{эф}} < 5000$ К, т.е. при периоде пульсаций $P \gtrsim 50$ сут.

Целью настоящей работы является исследование нелинейных пульсаций post-AGB звезд с эффективными температурами $3.6 \times 10^3 \text{ K} \leq T_{\text{эф}} \leq 2 \times 10^4 \text{ K}$. Начальными условиями при решении системы уравнений радиационной гидродинамики и нестационарной конвекции являются отдельные модели предварительно рассчитанных эволюционных последовательностей. Расчеты звездной эволюции проводились с использованием программы

MESA версии 10398 (Пакстон и др., 2018) от главной последовательности до стадии предшествующей планетарной туманности с эффективной температурой $T_{\text{эф}} \approx 3 \times 10^4$ К. Основные детали эволюционных расчетов (сетка ядерных реакций, конвективное перемешивание, скорость потери массы) описаны в работе (Фадеев, 2018). Предполагалось, что начальный химический состав соответствует звездам населения I при относительных массовых содержаниях водорода $X = 0.70$ и гелия $Y = 0.28$. Масштабирование начальных содержаний элементов тяжелее гелия проводилось согласно Гревессе и Соваль (1998). Описание уравнений гидродинамики и значения параметров теории нестационарной конвекции (Куфюсс, 1986) приводятся в работах Фадеева (2013, 2015).

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

В данной работе были рассчитаны три эволюционные последовательности звезд с массой на главной последовательности $M_0 = 1 M_\odot, 1.5 M_\odot$ и $2 M_\odot$. Участки эволюционных треков, которые использовались при определении начальных условий для расчета гидродинамических моделей, показаны на рис. 1. Возрастание светимости в правой части рисунка представляет заключительный этап эволюции на AGB после последней тепловой вспышки гелиевого слоевого источника. На этой стадии происходит быстрое уменьшение массы водородной оболочки M_{env} , а источником светимости звезды становится термоядерное горение водорода в слоевом источнике. Следуя Миллеру Бертолами (2016), будем полагать, что стадия post-AGB начинается при отношении массы водородной оболочки к массе звезды $M_{\text{env}}/M = 0.01$. На рис. 1 начало стадии post-AGB отмечено на каждом треке вертикальной чертой и для удобства дальнейшего изложения время эволюции t_{ev} отсчитывается от этой точки эволюционного трека. Дальнейшая эволюция звезды происходит в сторону возрастания ее эффективной температуры при незначительно изменяющейся светимости.

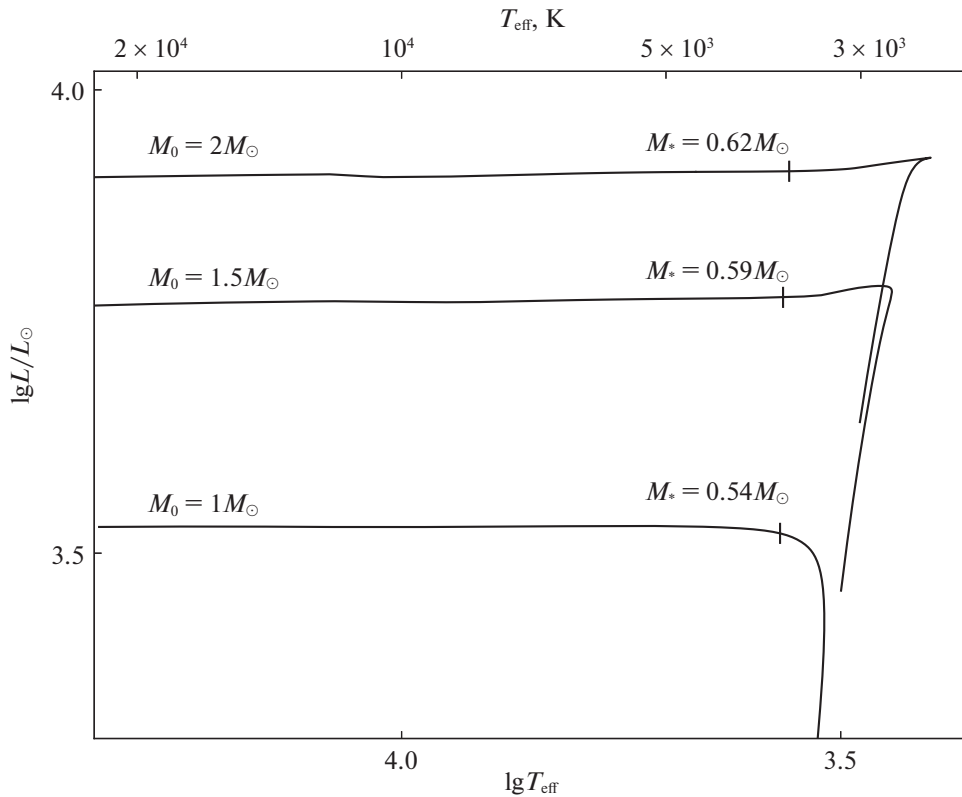


Рис. 1. Эволюционные треки звезд на фазе перехода из AGB в post-AGB. На каждом треке вертикальной чертой отмечено начало эволюционной стадии post-AGB и указано значение массы звезды M_* .

Основные характеристики звезд в начальной точке эволюционной стадии post-AGB перечислены в табл. 1, где M_0 — начальная масса звезды, t_* — возраст звезды, отсчитываемый от главной последовательности, M_* — масса звезды, $M_{CO,*}$ — масса вырожденного углеродно-кислородного ядра, L_* — светимость звезды, $T_{\text{eff},*}$ — эффективная температура.

В последнем столбце табл. 1 приведена продолжительность эволюционной стадии Δt_{ev} , в течение которой эффективная температура звезды возрастает до $T_{\text{eff}} = 2 \times 10^4$ К. При увеличении начальной массы звезды от $M_0 = 1 M_{\odot}$ до $M_0 = 2 M_{\odot}$ эта величина сокращается приблизительно в 20 раз. Более того, перемещение звезды post-AGB на диаграмме ГР происходит неравномерно. Графики эффективной температуры T_{eff} как функции времени эволюции t_{ev} показаны на рис. 2.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ post-AGB ЗВЕЗД

При эволюции на стадии post-AGB одновременно с уменьшением радиуса звезды происходит уменьшение протяженности зон частичной ионизации водорода и гелия. Таким образом, вместе

с эволюционным сокращением периода пульсаций уменьшаются темпы роста неустойчивости и нелинейность колебаний. При эффективной температуре $T_{\text{eff}} < 4000$ К возбуждение пульсаций происходит преимущественно в зоне частичной ионизации водорода, которая занимает значительную часть оболочки звезды. В звездах с более высокой эффективной температурой источником возбуждения колебаний становятся зоны частичной ионизации гелия. К сожалению, из-за отсутствия строгой повторяемости пульсационных движений невозможно вычислить интеграл $\oint PdV$ для каждой массовой зоны гидродинамической модели (здесь P — полное давление, V — удельный объем) и получить количественные оценки вклада отдельных слоев оболочки звезды в возбуждение или подавление неустойчивости.

Как и в предшествующих работах автора (Фадеев, 2017, 2018), посвященных исследованию нелинейных пульсаций звезд AGB, определение периода колебаний Π проводилось с помощью дискретного преобразования Фурье кинетической энергии пульсирующей оболочки звезды. Таким образом, полученные оценки Π являются средними значениями периода, определенными на отрезке времени t , в пределах которого проводилось реше-

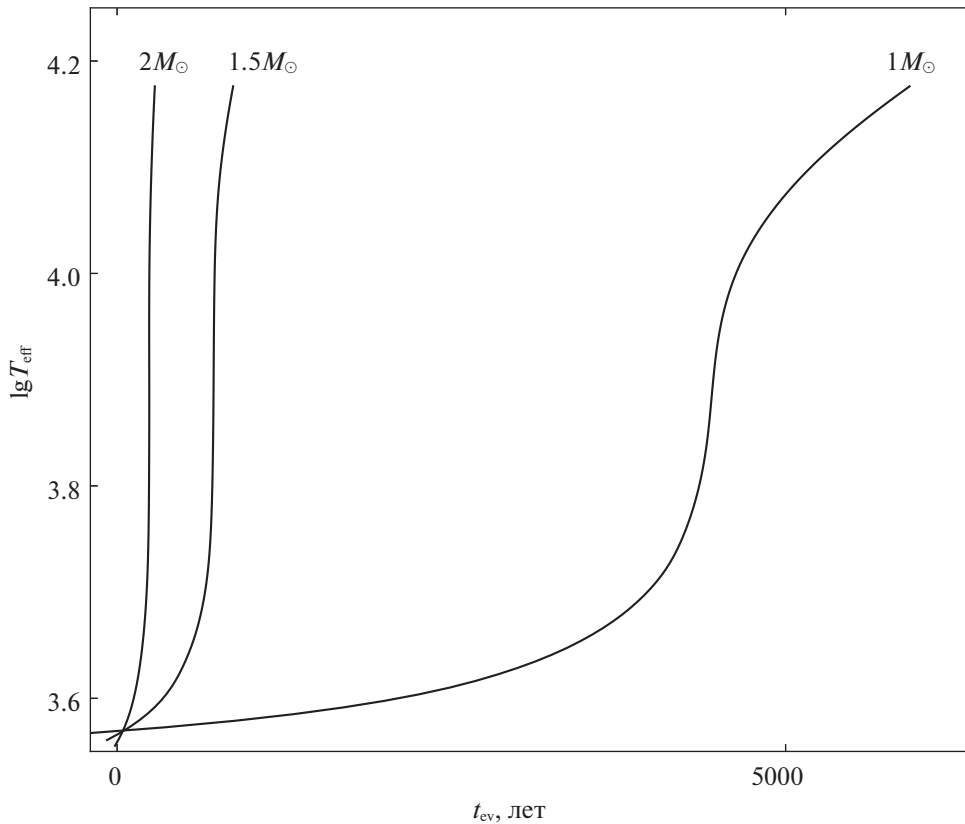


Рис. 2. Эффективная температура T_{eff} на стадии post-AGB как функция времени эволюции t_{ev} для эволюционных последовательностей $M_0 = 1 M_{\odot}$, $1.5 M_{\odot}$ и $2 M_{\odot}$.

ние уравнений гидродинамики. Для большинства гидродинамических моделей решение задачи Коши охватывало около ста пульсационных циклов.

Уменьшение роли нелинейных эффектов в ходе эволюции post-AGB звезды иллюстрируется на рис. 3, где приведены графики нормализованного спектра мощности кинетической энергии пульсационных движений для двух гидродинамических моделей эволюционной последовательности $M_0 = 1.5 M_{\odot}$. При эффективной температуре звезды $T_{\text{eff}} = 4800$ К темпы роста кинетической энергии пульсаций составляют $\eta = Pd \ln E_K / dt = 1.3$, а среднее значение периода пульсаций в фундаментальной моде $\Pi_0 = 85$ сут. Как следует из рисунка, изменения периода вследствие нелинейности происходят в пределах, составляющих около 20% среднего значения периода. В звезде с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 6500$ К темпы роста неустойчивости уменьшаются до $\eta = 0.04$, а нестабильность периода колебаний $\Pi_0 = 31$ сут сокращается до нескольких процентов.

Средние значения периода радиальных пульсаций как функции эффективной температуры для эволюционных последовательностей $M_0 = 1 M_{\odot}$, $1.5 M_{\odot}$ и $2 M_{\odot}$ показаны на рис. 4. В начальной

точке стадии post-AGB период колебаний для всех рассмотренных эволюционных последовательностей составляет $\Pi \approx 300$ сут и при возрастании эффективной температуры до $T_{\text{eff}} = 2 \times 10^4$ К сокращается более чем на два порядка величины. Для более удобного использования этих зависимостей при сравнении с результатами наблюдений мы приводим табл. 2 для каждой эволюционной последовательности возраст t_{ev} и период пульсаций Π post-AGB звезды в зависимости от эффективной температуры. Эти табличные данные были получены нелинейным интерполированием результатов эволюционных и гидродинамических расчетов.

В последнем столбце табл. 2 приводятся характерные значения амплитуды изменения болометрического блеска ΔM_{bol} . В звездах с эффективной температурой $T_{\text{eff}} < 6000$ К основная роль в модуляции лучистого потока принадлежит зоне ионизации водорода, поэтому амплитуда изменения блеска составляет $\Delta M_{\text{bol}} \approx 1$ зв. вел. При эффективной температуре $T_{\text{eff}} \approx 8 \times 10^3$ К область модуляции лучистого потока перемещается в слой частично ионизованного гелия и амплитуда изменения блеска уменьшается до $\Delta M_{\text{bol}} \approx 0.1$ зв. вел. При дальнейшем возрастании эффективной темпе-

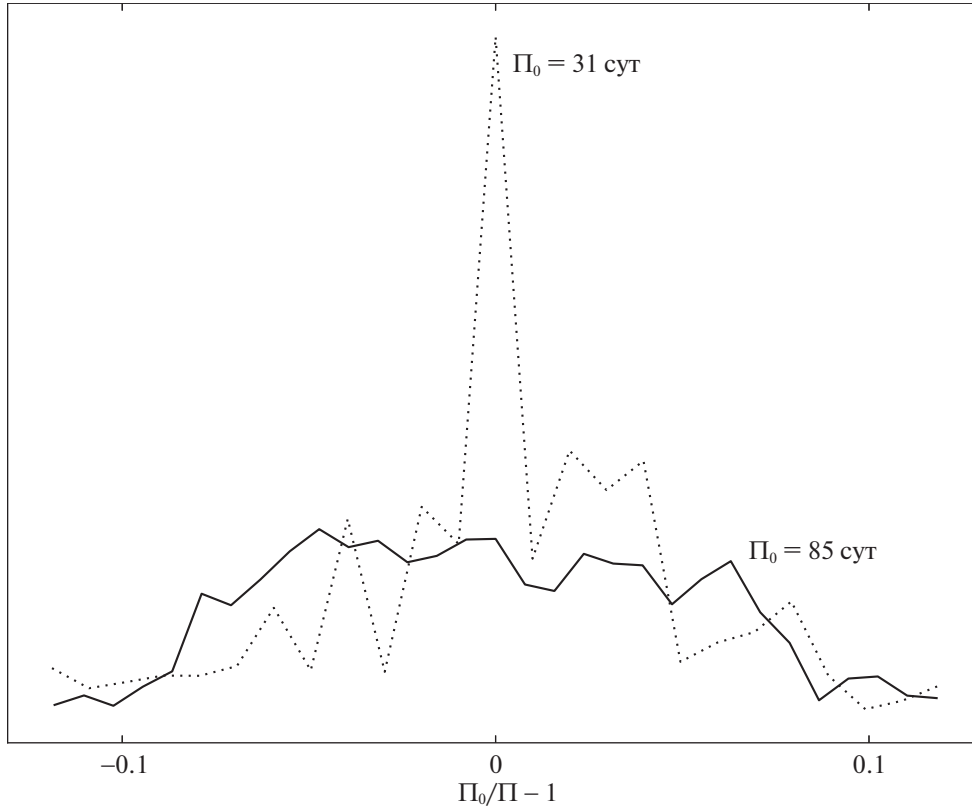


Рис. 3. Нормализованные спектры мощности кинетической энергии пульсационных движений E_K гидродинамических моделей с начальной массой $M_0 = 1.5 M_\odot$ при эффективной температуре звезды $T_{\text{eff}} = 4800$ К (сплошная линия) и $T_{\text{eff}} = 6500$ К (пунктирная линия). Около графиков указаны значения периода фундаментальной моды Π_0 .

Таблица 2. Возраст t_{ev} и период радиальных колебаний Π звезд post-AGB

$T_{\text{eff}}, \text{ К}$	$1 M_\odot$		$1.5 M_\odot$		$2 M_\odot$		ΔM_{bol}
	$t_{\text{ev}}, \text{ лет}$	$\Pi, \text{ сут}$	$t_{\text{ev}}, \text{ лет}$	$\Pi, \text{ сут}$	$t_{\text{ev}}, \text{ лет}$	$\Pi, \text{ сут}$	
3600	-1642	320.9	-146	346.4	-11	298.1	1.0
3800	953	180.8	171	207.1	77	207.8	
4000	2191	123.1	357	149.5	128	185.6	
4200	2866	100.1	466	121.5	161	145.7	
4500	3456	82.7	567	100.7	192	104.7	
5000	3957	57.5	656	73.4	220	81.7	
6000	4307	29.8	707	36.7	237	39.9	0.5
8000	4461	15.2	722	20.9	240	26.6	0.1
10 000	4630	9.4	729	15.7	241	19.4	0.01
12 000	5033	5.8	759	10.7	252	13.3	
15 000	5927	2.7	868	5.7	282	7.3	

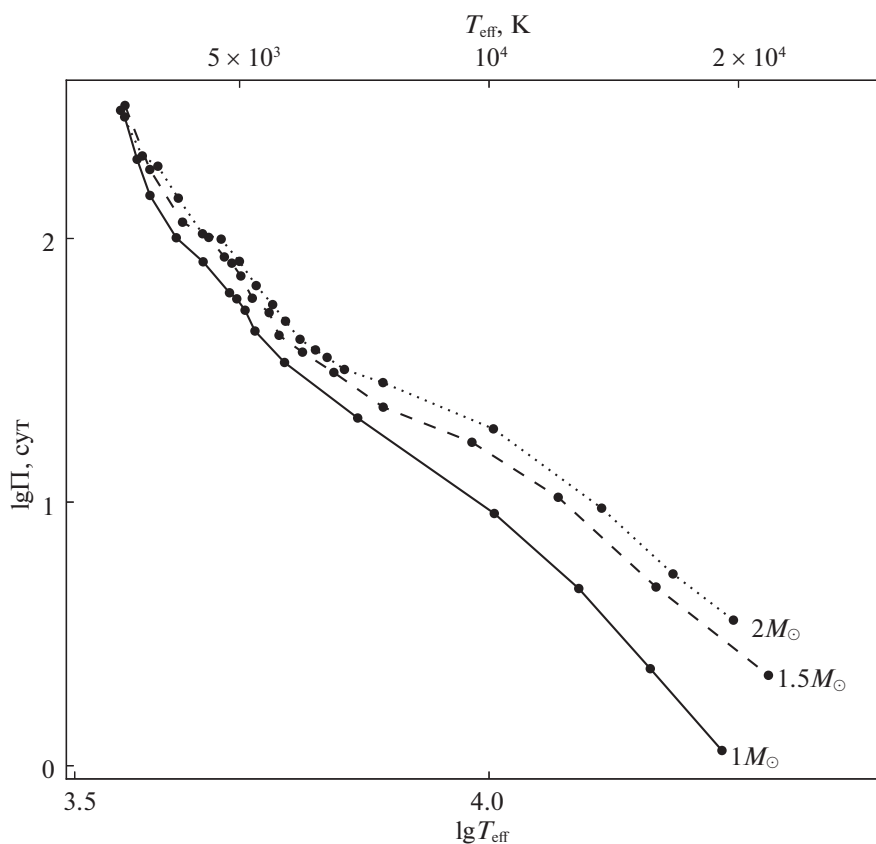


Рис. 4. Период радиальных пульсаций P как функция эффективной температуры T_{eff} для эволюционных последовательностей с начальной массой $M_0 = 1 M_{\odot}$ (сплошная линия), $1.5 M_{\odot}$ (штриховая линия) и $2 M_{\odot}$ (пунктирная линия). Заполненными кружками показаны средние значения периода пульсаций отдельных гидродинамических моделей.

ратуры амплитуда изменения блеска убывает вместе с уменьшением массы пульсирующей оболочки звезды и при $T_{\text{eff}} > 10^4$ К не превосходит 0.01 звездной величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты согласованных расчетов звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций позволили проследить изменения периода колебаний в ходе эволюции звезды на стадии post-AGB. Благодаря совместному решению уравнений радиационной гидродинамики и нестационарной конвекции, рассмотренные последовательности гидродинамических моделей охватывают интервал эффективных температур от 3600 К до 2×10^4 К. Примерно двадцатикратное возрастание скорости эволюции при изменении начальной массы звезды от $1 M_{\odot}$ до $2 M_{\odot}$ позволяет предполагать, что большинство наблюдаемых post-AGB являются результатом эволюции звезд с массой на главной последовательности, незначительно отличающейся от $M_0 \approx 1 M_{\odot}$. С точки зрения сравнения выводов теории с наблюдениями представляется необходимым расширение существующей сетки

эволюционных и гидродинамических моделей post-AGB звезд за счет учета влияния таких параметров звездной эволюции, как начальное содержание тяжелых элементов, скорость потери массы, длина пути конвективного перемешивания.

Зависимости, приведенные на рис. 4 и в табл. 2, могут быть использованы для установления принадлежности наблюдаемой пульсирующей переменной к звездам, находящимся на эволюционной стадии post-AGB. В качестве примера рассмотрим случай звезды AI CMi. Согласно Общему каталогу переменных звезд (Самусь и др., 2017) AI CMi является полуправильной пульсирующей переменной спектрального класса G5Iab с периодом изменения блеска $P \approx \approx 230$ сут. Полагая, что среднее значение эффективной температуры, соответствующее данному спектральному классу, составляет $4500 \text{ К} \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 5000 \text{ К}$, из табл. 2 находим, что верхний предел периода радиальных пульсаций post-AGB звезды примерно вдвое меньше, приведенного в каталоге, и составляет $P \approx 100$ сут. Наибольшие трудности при установлении эволюционного статуса предполагаемой post-AGB звезды связаны с определением периода изменения блеска. Таким образом,

возникшее противоречие между принадлежностью AI CMi к post-AGB звездам и наблюдаемым периодом может быть устранено посредством уточнения значения Π в сторону его уменьшения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айкава (T. Aikawa), *Astrophys. Space Sci.* **112**, 125 (1985a).
2. Айкава (T. Aikawa), *Astrophys. Space Sci.* **116**, 401 (1985b).
3. Айкава (T. Aikawa), *Astrophys. J.* **374**, 700 (1991).
4. Айкава (T. Aikawa), *MNRAS* **262**, 893 (1993).
5. Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Татарников А.М., Юдин Б.Ф., Письма в Астрон. журн. **35**, 846 (2009) [V.P. Arkhipova, V.F. Esipov, N.P. Ikonnikova, G.V. Komissarova, A.M. Tatarnikov, and B.F. Yudin, *Astron. Lett.* **35**, 764 (2009)].
6. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 281 (2010) [V.P. Arkhipova, N.P. Ikonnikova, and G.V. Komissarova, *Astron. Lett.* **36**, 269 (2010)].
7. Архипова В.П., Таранова О.Г., Иконникова Н.П., Есипов В.Ф., Комиссарова Г.В., Шенаврин В.И., Бурлак М.А., Письма в Астрон. журн. **42**, 831 (2016) [V.P. Arkhipova, O.G. Taranova, N. P. Ikonnikova, V.F. Esipov, G.V. Komissarova, V.I. Shenavrin, and M.A. Burlak, *Astron. Lett.* **42**, 756 (2016)].
8. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Есипов В.Ф., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **43**, 460 (2017) [V.P. Arkhipova, N.P. Ikonnikova, V.F. Esipov, and G.V. Komissarova, *Astron. Lett.* **43**, 416 (2017)].
9. Блокер (T. Blöcker), *Astron. Astrophys.* **299**, 755 (1995).
10. Вассилиадис, Вуд (E. Vassiliadis and P.R. Wood), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **92**, 125 (1994).
11. Вайс, Фергюсон (A. Weiss and J.W. Ferguson), *Astron. Astrophys.* **508**, 1343 (2009).
12. Вольк, Квок (K.M. Volk and S. Kwok), *Astrophys. J.* **342**, 345 (1989).
13. Вуд, Фолкнер (P.R. Wood and D.J. Faulkner), *Astrophys. J.* **307**, 659 (1986).
14. Готши (A. Gautschy), 1993, *MNRAS* **265**, 340 (1993).
15. Гревессе, Соваль (N. Grevesse and A.J. Sauval), *Space Sci. Rev.* **85**, 161 (1998).
16. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, S. Kwok, and K.M. Volk), *Astrophys. J.* **346**, 265 (1989).
17. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, S. Kwok, and T.R. Geballe), *Astrophys. J.* **420**, 783 (1994).
18. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, W. Lu, and K.A. Nault), *Astron. J.* **149**, 184 (2015).
19. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, G. Van de Steene, H. Van Winckel, W. Lu, and J. Sperauskas), *Astron. J.* **156**, 300 (2018).
20. Залевски (J. Zalewski), *Acta Astron.* **35**, 51 (1985).
21. Залевски (J. Zalewski), *Acta Astron.* **43**, 431 (1993).
22. Иконникова Н.П., Таранова О.Г., Архипова В.П., Комиссарова Г.В., Шенаврин В.И., Есипов В.Ф., Бурлак М.А., Метлов В.Г., Письма в Астрон. журн. **44**, 499 (2018) [N.P. Ikonnikova, O.G. Taranova, V.P. Arkhipova, G.V. Komissarova, V.I. Shenavrin, V.F. Esipov, M.A. Burlak, and V.G. Metlov, *Astron. Lett.* **44**, 457 (2018)].
23. Куфюсс (R. Kuhfuß), *Astron. Astrophys.* **160**, 116 (1986).
24. Миллер Бертолами (M.M. Bertolami), *Astron. Astrophys.* **588**, A25 (2016).
25. Пакстон и др. (B. Paxton, J. Schwab, E.B. Bauer, L. Bildsten, S. Blinnikov, P. Duffell, R. Farmer, J.A. Goldberg, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **234**, 34 (2018).
26. Пачинский (B. Paczyński), *Acta Astron.* **21**, 417 (1971).
27. Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Дурлевич О.В., Киреева Н.Н., Пастухова Е.Н., Астрон. журн. **94**, 87 (2017) [N.N. Samus', E.V. Kazarovets, O.V. Durlevich, N.N. Kireeva, and E.N. Pastukhova, *Astron. Rep.* **61**, 80 (2017)].
28. Тухман и др. (Y. Tuchman, N. Sack, and Z. Barkat), *Astrophys. J.* **219**, 183 (1978).
29. Фадеев (Yu.A. Fadeyev), *Astrophys Space Sci.* **86**, 143 (1982).
30. Фадеев (Yu.A. Fadeyev), *Astrophys Space Sci.* **100**, 329 (1984).
31. Фадеев Ю.А., 2013, Письма в Астрон. журн. **39**, 342 (2013) [Yu.A. Fadeyev, *Astron. Lett.* **39**, 306 (2013)].
32. Фадеев (Yu.A. Fadeyev), *MNRAS* **449**, 1011 (2015).
33. Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 663 (2017) [Yu.A. Fadeyev, *Astron. Lett.* **43**, 602 (2017)].
34. Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. **44**, 595 (2018) [Yu.A. Fadeyev, *Astron. Lett.* **44**, 546 (2018)].
35. Фадеев, Тутуков (Yu.A. Fadeyev and A.V. Tutukov), *MNRAS* **195**, 811 (1981).
36. Фокин и др. (A.B. Fokin, A. Lébre, H. Le Coroller, and D. Gillet), 2001, *Astron. Astrophys.* **378**, 546 (2001).
37. Шкловский И.С., Астрон. журн. **33**, 315 (1956).
38. Шонбернер (D. Schönberner), *Astron. Astrophys.* **79**, 108 (1979).
39. Шонбернер (D. Schönberner), *Astron. Astrophys.* **103**, 119 (1981).