АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2014, том 91, № 11, с. 914–932

УДК 524.3-54

УВЕЛИЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В ЗВЕЗДАХ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МАСС

© 2014 г. Е. И. Старицин*

Коуровская астрономическая обсерватория им. К.А. Бархатовой,
Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 22.01.2014 г.; принята в печать 21.05.2014 г.

Эволюция вращающихся звезд с массами 8, 4 и 2 $M_\odot$ на главной последовательности рассмотрена одновременно с гидродинамическими явлениями переноса в их недрах. Показано, при каких условиях совместное действие турбулентной эрозии, полуконвекции и сдвиговой турбулентности приводит к частичному перемешиванию вещества лучистой оболочки и центральных частей этих звезд. Увеличение со временем содержания гелия в веществе на поверхности этих звезд зависит как от интенсивности частичного перемешивания вещества в их недрах, так и от потери массы со звездным ветром. Поверхностное отношение концентраций гелия и водорода может увеличиться к концу эволюции на главной последовательности на $\sim$30% в звезде с массой 8 $M_\odot$ и на $\sim 10-20\%$ в звезде с массой 4 $M_\odot$ в зависимости от темпа потери массы. Частичное перемешивание вещества лучистой оболочки с веществом, расположенным в центральной части звезды, может быть, таким образом, причиной наблюдаемого увеличения содержания гелия в атмосферах B-звезд ранних спектральных подклассов к концу их эволюции на главной последовательности. Увеличение поверхностного содержания гелия в звезде с массой 2 $M_\odot$ необнаружимо мало, причем оно заметно меньше, чем под поверхностью.

DOI: 10.7868/S000462991411005X

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная теория строения и эволюции звезд дает достаточно глубокое понимание большого числа наблюдаемых свойств звезд, находящихся на разных стадиях эволюции [1–3]. К неисследованным относятся вопросы, связанные с ролью гидродинамических явлений переноса в эволюции звезд. В разных слоях звезды могут действовать различные гидродинамические процессы, ведущие к полному или частичному перемешиванию вещества. Положение границ областей, в которых действуют различные процессы перемешивания, и степень перемешивания вещества разных слоев звезды, отличающихся химическим составом, остаются предметом исследования. Полное или частичное перемешивание слоев звезды с разным химическим составом отражается на строении звезды, ее наблюдаемых характеристиках и изменении их со временем. Особенно интересны случаи, когда область перемешивания включает слои, физические условия в которых допускают протекание тех или иных ядерных реакций. Даже неполное перемешивание вещества этих слоев с другими может обеспечить как отток ядерного топлива из тех слоев звезды, где условий для протекания ядерных реакций нет, так и вынос продуктов ядерного горения в эти слои.

Обнаружение пониженного по сравнению с солнечным [4] и межзвездным [5] содержания бора в атмосферах B-звезд главной последовательности с массами $8\ M_\odot \leq M \leq 15\ M_\odot$ является свидетельством частичного перемешивания вещества, происходящего в лучистых оболочках этих звезд [6–8]. Разрушение бора в ядерных реакциях происходит при температурах $\sim 6 \times 10^6$ K и больше. Температура вещества достигает таких значений в слоях звезды, расположенных относительно неглубоко под ее поверхностью. Частичное перемешивание вещества этих и выше расположенных слоев звезды может привести к уменьшению поверхностного содержания бора уже на ранних стадиях эволюции звезды на главной последовательности [9].

Свидетельством того, что процессы перемешивания той или иной степени интенсивности охватывают все слои звезды, может быть повышенное содержания гелия и азота в атмосферах B-звезд главной последовательности [10–12]. В работе [13] определено содержание гелия в атмо-

*E-mail: Evgeny.Staritsin@urfu.ru

сферах 100 звезд спектральных подклассов B0–B5. При составлении выборки звезд были исключены спектрально-двойные, пульсирующие, химически пекулярные звезды с пониженным содержанием гелия и Be-звезды. Содержание гелия по числу атомов относительно содержания водорода $N_{\rm He}/N_{\rm H}$ в атмосферах исследованных звезд с массами $4\ M_\odot \le M \le 12\ M_\odot$ возрастает за время их эволюции на главной последовательности на $26 \pm \pm 10\%$ и может достигать $\sim 67\%$ у звезд с массами $12\ M_\odot \le M \le 19\ M_\odot$. В работе [14] определено содержание гелия в атмосферах 326 B-звезд из 19 молодых рассеянных скоплений. Исключив двойные и химически пекулярные звезды из выборки, авторы [14] нашли увеличение содержания гелия со временем по данным о 88 звездах спектральных подклассов B0–B2. Массы этих звезд находятся в диапазоне $8\ M_\odot \le M \le 16 M_\odot$. Содержание гелия возрастает за время эволюции на главной последовательности на $23 \pm 13\%$. Большая часть исследованных звезд со спектральными подклассами позже B2 не завершили сжатие к начальной главной последовательности [14]. У более массивных O-звезд ($M \ge 25\ M_\odot$) содержание гелия в атмосфере может увеличиться за время эволюции на главной последовательности в ~ 2 раза [15–17].

В работе [18] высказано предположение о том, что повышенное содержание гелия в атмосферах химически пекулярных B-звезд может образоваться в результате процессов, протекающих в звездном ветре, — а именно, предполагается, что не весь гелий, содержащийся в веществе атмосферы, уносится со звездным ветром, а только часть его. Другая часть выпадает обратно на звезду, образуя избыточное содержание гелия в атмосфере звезды. У горячих звезд главной последовательности звездный ветер образуется в результате поглощения излучения, идущего от звезды, в линиях ионов тяжелых элементов с последующей передачей импульса от ионов тяжелых элементов протонам и ионам гелия вследствие кулоновских взаимодействий [19].

У B-звезд главной последовательности ранних спектральных подклассов плотность звездного ветра низкая, поэтому возможен дрейф тяжелых элементов относительно основной массы газа, приходящейся на водород и гелий, а также возможен дрейф протонов относительно ионов гелия. Вследствие дрейфа возникает сила трения между различными составляющими звездного ветра, состоящими из различных химических элементов [20, 21]. Гелий в околозвездной части ветра B-звезд с эффективной температурой больше $\sim 15\,000$ K находится преимущественно в состоянии однократной ионизации [18, 22]. С учетом такой ионизации гелия и силы трения между протонной и гелиевой составляющими звездного ветра и при солнечном содержании тяжелых элементов поток гелия разгоняется до скоростей, достаточных для преодоления гравитационного притяжения звезды [22]. Таким образом, процессы, действующие в звездном ветре, не могут быть причиной изменения относительного содержания водорода и гелия в атмосферах B-звезд.

Еще одним индикатором перемешивания вещества в недрах звезд является ширина главной последовательности и некоторые особенности в расположении звезд рассеянных скоплений на диаграмме Герцшпрунга–Рессела [23–26]. В стандартных расчетах эволюции B-звезд главной последовательности полностью перемешанными считают расположенные в центре слои звезды, в которых выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости [1–3]. Весь водород, находящийся в этой области, доступен для ядерных реакций, протекающих в самом центре звезды. Поэтому масса гелия, синтезированного за время эволюции на главной последовательности, определяется в таких расчетах размером области, в которой выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости. Но эта масса получается меньше, чем та, которая необходима для объяснения наблюдаемой ширины главной последовательности рассеянных скоплений.

Таким образом, наблюдаемое в атмосферах звезд содержание химических элементов, которые могут быть топливом или продуктами ядерных реакций, протекающих в звездных недрах на стадии горения водорода в ядре, и наблюдаемые диаграммы "цвет — величина" рассеянных звездных скоплений являются индикаторами процессов перемешивания вещества в недрах звезд главной последовательности.

Кроме конвекции, в недрах звезд действуют другие гидродинамические процессы полного или частичного перемешивания вещества. Это турбулентная эрозия (turbulent entrainment) [27], полуконвекция [28], меридиональная циркуляция [29, 30], сдвиговая турбулентность, вызванная нетвердотельным вращением звезды [31]. Расчеты эволюции звезд с учетом вращения и вызванных им гидродинамических процессов позволили получить объяснение наблюдаемого увеличения содержания гелия в атмосферах звезд главной последовательности с массами больше $\sim 25\ M_\odot$ [32], но в звездах с меньшими массами такого увеличения содержания гелия в расчетах не происходит [33, 34].

O-звезды интенсивно теряют вещество со звездным ветром [35]. В наиболее массивных звездах слой с переменным химическим составом может оказаться на поверхности звезды в результате потери массы уже на стадии главной последовательности [36]. Дальнейшая потеря массы обнажает слои с повышенным содержанием гелия.

Темпы потери вещества у B-звезд главной последовательности ранних спектральных подклассов значительно меньше [37, 38]. Слой с переменным химическим составом не может оказаться на поверхности таких звезд в результате потери массы. Повышенное поверхностное содержание гелия может образоваться в этом случае в результате частичного перемешивания вещества внешней части звезды и слоя с переменным химическим составом или с веществом расположенной в центре звезды области полного перемешивания. В данной работе изучаются условия, при которых такое перемешивание может осуществиться в недрах звезд с массами 8, 4 и 2 $M_\odot$.

2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВЕЩЕСТВА В НЕДРАХ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЗВЕЗДЫ

Гидродинамическая модель перемешивания вещества в недрах вращающейся звезды описывает перенос концентраций химических элементов и момента импульса в вертикальном направлении. Модель учитывает следующие процессы: турбулентная эрозия, меридиональная циркуляция, сдвиговая турбулентность, полуконвекция. Предполагается, что вследствие анизотропии турбулентности звезда находится в состоянии слоистого (shellular) вращения [31, 39]. Угловая скорость вращения $\Omega(r)$ меняется в вертикальном направлении в зависимости от среднего расстояния до поверхности постоянного давления и имеет примерно постоянное значение на каждой такой поверхности.

2.1. Турбулентная эрозия

Центральные части звезд главной последовательности с массой $M > 1.5\ M_\odot$ неустойчивы относительно конвекции. Размер области, охваченной конвективными движениями, в стандартных расчетах эволюции звезд определяется по локальному критерию конвективной неустойчивости [1–3]. Эта область окружена конвективно устойчивыми слоями вещества согласно тому же локальному критерию. Движение вещества в области конвективной неустойчивости звезды носит турбулентный характер. Вещество поднимающейся турбулентной струи растекается в горизонтальной плоскости вблизи границы области, охваченной турбулентным движением, и затем опускается, обтекая область подъема. На участке горизонтального течения скорость движения разных слоев в струе, расположенных один над другим, меняется в вертикальном направлении. Это сдвиговое течение вовлекает в движение выше расположенные конвективно устойчивые слои, унося вещество этих слоев в глубь турбулентной области. Граница, разделяющая область конвективной турбулентности и устойчивые слои звезды, перемещается по веществу устойчивых слоев в результате подключения все новых и новых масс вещества к турбулентному течению. Скорость V_e, с которой граница перемещается по веществу устойчивых слоев, определяется законом турбулентной эрозии

$$V_e/V_t = A\mathrm{Ri_B}^{-n}, \qquad (1)$$

где V_t — характерное значение турбулентных пульсаций скорости вблизи границы, n и A — параметры закона турбулентной эрозии,

$$\mathrm{Ri_B} = \frac{\triangle b\ell}{V_t^2}$$

— объемное число Ричардсона, ℓ — наибольший масштаб турбулентных движений,

$$\triangle b = \int\limits_h N^2 dr$$

— скачок плавучести поперек границы, N — локальная частота плавучести, $h \sim V_c/N$, V_c — конвективная скорость.

Значение параметра n в случае турбулентной эрозии на границе конвективных ядер звезд главной последовательности определено посредством анализа результатов трехмерного численного моделирования конвективной турбулентности в звездных недрах: $n = 1.05 \pm 0.21$ [27]. Характерное значение турбулентных пульсаций скорости V_t связано с темпом диссипации кинетической энергии турбулентного течения в звездных недрах ϵ_k известным соотношением Колмогорова [40, 41]. Модель для определения ϵ_k по данным одномерных расчетов строения звезды предложена в работе [42]. Используя эту модель, можно последовательно определить ϵ_k, V_t, V_e и расстояние d от границы области, в которой выполняется локальное условие конвективной неустойчивости, до границы области конвективной турбулентности [43]:

$$d = V_e \triangle t, \qquad (2)$$

где $\triangle t$ — шаг по времени при численных расчетах эволюции звезд. Конвективная турбулентность поддерживает однородный химический состав вещества в центральной части звезды, где она имеет место [27]. Расстояние d обычно выражают в высотах шкалы по давлению H_P, определяемой на границе области, в которой выполняется локальное условие конвективной неустойчивости; $\alpha = d/H_P$ [24]. В данной работе в области конвективной турбулентности предполагается твердотельное вращение.

2.2. Меридиональная циркуляция и сдвиговая турбулентность

Перенос момента импульса меридиональной циркуляцией и сдвиговой турбулентностью в вертикальном направлении во внешних слоях звезды, расположенных над областью конвективной турбулентности, определяется законом сохранения момента импульса [44]:

$$\frac{\partial(\rho\varpi^2\Omega)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho\varpi^2\Omega\mathbf{u}) = \mathrm{div}(\rho\nu_{\mathrm{v}}\varpi^2\mathrm{grad}\Omega), \quad (3)$$

где ρ — плотность, ϖ — расстояние до оси вращения, t — время, $\mathbf{u}$ — скорость меридиональной циркуляции, ν_{v} — турбулентная вязкость в вертикальном направлении. Решение уравнения (3) позволяет определить распределение угловой скорости вращения.

Вертикальная компонента скорости меридиональной циркуляции в случае слоистого вращения звезды может быть записана в виде [31]

$$U_r(r,\theta) = U(r)P_2(\theta),$$

где $U(r)$ — амплитуда вертикальной компоненты скорости меридиональной циркуляции, $P_2(\theta)$ — полином Лежандра второй степени. Амплитуда $U(r)$ может быть определена из закона сохранения энергии в стационарном случае [31, 45]:

$$\rho T\mathbf{u}\mathrm{grad}s = \rho\varepsilon_n + \mathrm{div}(\chi\mathrm{grad}T) - \mathrm{div}\mathbf{F}_h, \quad (4)$$

где T — температура, s — удельная энтропия, ε_n — темп выделения ядерной энергии, χ — теплопроводность, $\mathbf{F}_h = -\nu_h\rho T\partial s/\partial\mathbf{i}_\theta$ — турбулентный поток энтальпии в горизонтальном направлении, ν_h — турбулентная вязкость в горизонтальном направлении, т.е. вдоль поверхности постоянного давления.

2.3. Полуконвекция

Линейный анализ устойчивости газовой среды с излучением показывает неустойчивость этой среды, когда выполняется условие [46]:

$$\nabla_a \le \nabla \le \nabla_a + \frac{\beta}{4-3\beta}\nabla_\mu,$$

где ∇ — градиент температуры, ∇_a — адиабатический градиент температуры, ∇_μ — градиент средней молекулярной массы, β — отношение давления газа к полному.

В моделях звезд главной последовательности, не учитывающих вращение, такая неустойчивость появляется в слое с переменным химическим составом, образующимся в процессе эволюции массивной звезды ($M > 10\ M_\odot$) вследствие уменьшения массы конвективного ядра. Эта неустойчивость является причиной частичного перемешивания вещества в слое с переменным химическим составом. Детальные модели этого перемешивания, такие как, например, модель турбулентной эрозии, в настоящее время еще не разработаны. В результате частичного перемешивания вещества — полуконвекции — в слое с переменным химическим составом может установиться состояние нейтральности относительно неустойчивости. Выдвинуто два критерия нейтральности в полуконвективной зоне. Это S-критерий [28]

$$\nabla = \nabla_a \quad (5)$$

и, как предложено в [47], L-критерий [48]

$$\nabla = \nabla_a + \frac{\beta}{4-3\beta}\nabla_\mu.$$

Полуконвекция перемешивает вещество в слое с переменным химическим составом, но она неэффективна в переносе момента импульса по сравнению с меридиональной циркуляцией [49]. Наиболее сильное перемешивание вещества происходит, когда в качестве критерия нейтральности выбран S-критерий.

2.4. Перенос концентраций химических элементов

Перенос массы водорода описывается уравнением диффузии [50]

$$\frac{\partial(\rho X)}{\partial t} = \mathrm{div}(\rho D\mathrm{grad}X). \quad (6)$$

Здесь X — содержание водорода по массе, а коэффициент диффузии D определяется суммой $D = D_{\mathrm{v}} + D_{sc}$, где D_{v} — коэффициент турбулентной диффузии в вертикальном направлении, D_{sc} — коэффициент диффузии, обусловленной полуконвекцией.

Коэффициенты турбулентной вязкости ν_t и диффузии D_t различаются в разных течениях по величине, и они могут меняться внутри течения на несколько порядков, однако их отношение — турбулентное число Шмидта

$$\mathrm{Sc}_t = \nu_t/D_t \quad (7)$$

— слабо меняется как в пределах рассматриваемого течения, так и от течения к течению [51, 52]. Меридиональная циркуляция неэффективна в переносе химических элементов в вертикальном направлении по сравнению со сдвиговой турбулентностью [49].

2.5. Коэффициенты турбулентной вязкости

Коэффициент турбулентной вязкости в вертикальном направлении определяется из условия равенства работы сил тяжести по перестановке местами двух произвольных жидких элементов избытку кинетической энергии в потоке. При этом учитывается дестабилизирующая роль процесса обмена энергией элемента и окружающего вещества вследствие переизлучения фотонов и дестабилизирующая роль процесса переноса концентраций химических элементов в горизонтальном направлении вследствие анизотропии турбулентности. Коэффициент турбулентной вязкости в вертикальном направлении имеет вид [53]:

$$\nu_{\rm v} = \frac{2{\rm Ri}_c}{N_T^2/(K+D_h)+N_\mu^2/D_h}\left(\frac{d(\varpi\Omega)}{dr}\right)^2, \quad (8)$$

где $K = 4acT^3/3c_P\rho^2\kappa$, $N_T^2 = (g\delta/H_p)(\nabla_a - \nabla)$, $N_\mu^2 = (g/H_p)\nabla_\mu$, $N^2 = N_T^2 + N_\mu^2$, ${\rm Ri}_c$ — критическое значение локального числа Ричардсона, D_h — коэффициент турбулентной диффузии в горизонтальном направлении, a — постоянная Стефана, c — скорость света, c_P — удельная теплоемкость при постоянном давлении, κ — коэффициент непрозрачности, g — среднее значение ускорения свободного падения на поверхности постоянного давления, $\delta = (4-3\beta)/\beta$.

Коэффициент турбулентной вязкости в горизонтальном направлении определен на основе рассмотрения баланса переноса момента импульса меридиональной циркуляцией через поверхность постоянного давления и сдвиговой турбулентностью вдоль этой поверхности [31]:

$$\nu_h \sim C_z r\,|U(r)|\,. \quad (9)$$

Параметр C_z содержит отношение амплитуды изменения угловой скорости вращения на поверхности постоянного давления к среднему значению угловой скорости на этой поверхности и полагался порядка единицы. Однако условие анизотропии турбулентности при $C_z \sim 1$ не выполняется [54]. Два других выражения для коэффициента турбулентной вязкости в горизонтальном направлении получены на основе рассмотрения темпа диссипации избытка кинетической энергии в турбулентном течении [55] и на основе измерений вращательного момента в классических экспериментах с течением Куеттэ-Тейлора [56]. В обоих случаях коэффициент получается на 2 порядка больше, чем по (9) при $C_z \sim 1$. Однако в каждом случае выражение для коэффициента содержит свободный параметр. Поэтому в данной работе для определения коэффициента турбулентной вязкости в горизонтальном направлении используется выражение (9). Значение параметра C_z выбирается исходя из требования применимости выражения (9) [31]:

$$\nu_{\rm v} \ll \nu_{\rm h} \ll K.$$

2.6. Параметры гидродинамической модели перемешивания вещества в звездных недрах

Современная модель перемешивания вещества в звездных недрах содержит следующие свободные параметры: параметр C_z в выражении для коэффициента турбулентной вязкости в горизонтальном направлении, турбулентное число Шмидта ${\rm Sc}_t$, которое связывает коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии, параметр A из закона турбулентной эрозии, степень перемешивания вещества в полуконвективной зоне. Параметры ${\rm Sc}_t$ и A обычно определяются по экспериментальным данным [51, 52, 57]. При изучении эволюции звезд эти параметры также должны быть ограничены на основе данных наблюдений. Картина перемешивания вещества в полуконвективной области должна быть определена посредством трехмерных гидродинамических расчетов. Возможно, анализ результатов таких расчетов позволит построить модель перемешивания в полуконвективной зоне, как это было сделано для случая турбулентной эрозии [42]. Для определения коэффициента турбулентной вязкости в горизонтальном направлении, по-видимому, требуются дополнительные исследования [56].

Таким образом, современная модель перемешивания вещества в звездных недрах не только может быть использована для изучения особенностей эволюции вращающихся звезд, но и сама должна быть ограничена данными наблюдений, а также нуждается в дополнительных исследованиях.

3. ПОТЕРЯ ВЕЩЕСТВА ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ

Для определения темпов потери массы при расчете эволюции звезды с массой 8 $M_\odot$ в данной работе используется интерполяционная формула [58], полученная по результатам определения темпов потери массы на основе данных наблюдений. Теоретические темпы потери массы у B-звезд главной последовательности вычислены в работе [38], причем для определения ионизации и состояния возбуждения различных атомов решалась система уравнений статистического равновесия. Рассчитанное значение темпа потери массы у звезды с массой 7.84 $M_\odot$ при солнечном химическом составе вещества совпадает с оценкой по формуле из [58]. С уменьшением массы звезды плотность звездного ветра и, как следствие, взаимодействие ионов тяжелых элементов с протонами

Масса моделей звезд, значения параметров модели перемешивания и некоторые характеристики строения и эволюции звезд на главной последовательности

$M, M_\odot$	Sc_t	Критерий	α_0	$(\Omega_c/\Omega_s)_0$	X_c^{beg}	X_c^{cont}	$\Delta M_{\mathrm{He}}, M_\odot$	$t_{MS}, 10^6$ лет	$\Delta M_{lost}, M_\odot$
8	0.1	S	0.05	1.23	0.59	0.56	2.23	36.8	0.0103
8	0.3	S	0.05	1.23	0.47	0.20	1.26	29.1	0.0026
8	1.0	S	0.05	1.23	–	–	1.21	28.3	0.0024
8	0.1	–	0.05	1.23	–	–	1.21	28.3	0.0024
8	0.1	S	0.15	1.21	0.40	0.36	1.91	35.3	0.0066
8	0.1	S	0.25	1.19	0.22	0.15	1.67	32.9	0.0048
4	0.1	S	0.05	1.38	0.56	0.50	0.57	147.7	(?)
2	0.1	S	0.05	1.48	0.27	0.17	0.19	877.8	0.0

и ионами гелия уменьшается. Если масса звезды меньше $\sim$4 $M_\odot$, взаимодействие столь слабое, что выброс водорода и гелия становится невозможным. Звезда с массой 4 $M_\odot$ находится на нижнем пределе существования звездного ветра горячих звезд. Эволюция этой звезды рассчитана с минимально возможным темпом потери массы согласно [38].

4. ЧАСТИЧНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ВЕЩЕСТВА В ЗВЕЗДНЫХ НЕДРАХ

Частичное перемешивание вещества в недрах вращающейся звезды обусловлено одновременным действием нескольких процессов перемешивания, происходящих в разных частях звезды. Турбулентная эрозия действует на границе области конвективной турбулентности, турбулентная диффузия действует в неконвективных слоях звезды. В слое с переменным химическим составом, образующимся над областью конвективной турбулентности в процессе эволюции звезды, может действовать полуконвекция. Частичное перемешивание вещества в недрах звезды изучено в зависимости от интенсивности каждого из этих процессов перемешивания, а также от массы звезды. Интенсивность перемешивания вещества турбулентной диффузией определяется заданием турбулентного числа Шмидта Sc_t. Интенсивность перемешивания в полуконвективной зоне определяется выбором критерия нейтральности относительно полуконвекции. Положение границы области конвективной турбулентности зависит от параметра A, который может быть заменен начальным значением параметра α.

Эволюция звезд с массами 8, 4 и 2 $M_\odot$ изучена на стадии горения водорода в центре при различном выборе этих параметров (таблица). Уравнения (1)–(9) решены совместно с уравнениями строения звезды. В качестве независимой переменной используется масса вещества под поверхностью постоянного давления. Расчеты проведены по программе Пачинского [59], которая была модифицирована для учета влияния вращения на строение звезды [60] и для включения гидродинамических явлений переноса [43, 49, 61, 62]. Исходный химический состав звездного вещества задан близким к солнечному: $(X, Z) = (0.70, 0.02)$, где X и Z – содержание водорода и тяжелых элементов по массе. Для высокотемпературной области ($\lg T \geq 4.0$) используются таблицы непрозрачностей из работы [63], в низкотемпературной ($\lg T < 4.0$) – таблицы из работы [64]. Параметр C_z принят равным 10^2. При таком выборе C_z коэффициент турбулентной вязкости в горизонтальном направлении ν_h примерно на 2 порядка больше, чем в вертикальном, и максимальное значение ν_h на полпорядка меньше величины K. Критическое значение локального числа Ричардсона Ri_c принято равным 1/4.

Перепад угловых скоростей вращения между границей области конвективной турбулентности и поверхностью звезды в начальной модели эволюционной последовательности $(\Omega_c/\Omega_s)_0$ выбирался так, чтобы характерное время переноса момента импульса меридиональной циркуляцией совпадало с ядерной шкалой времени эволюции звезды [61, 62]. Скорость вращения звезды на экваторе в начале эволюции задавалась во всех случаях равной 250 км/с. Момент импульса при этом получился равным 6.94×10^{51}, 2.02×10^{51} и 0.55×10^{51} эрг с для звезд с массами 8, 4 и 2 $M_\odot$, соответственно.

4.1. Роль сдвиговой турбулентности

В газовых потоках, находящихся в состоянии свободного турбулентного течения, эффективность турбулентного переноса концентраций химических

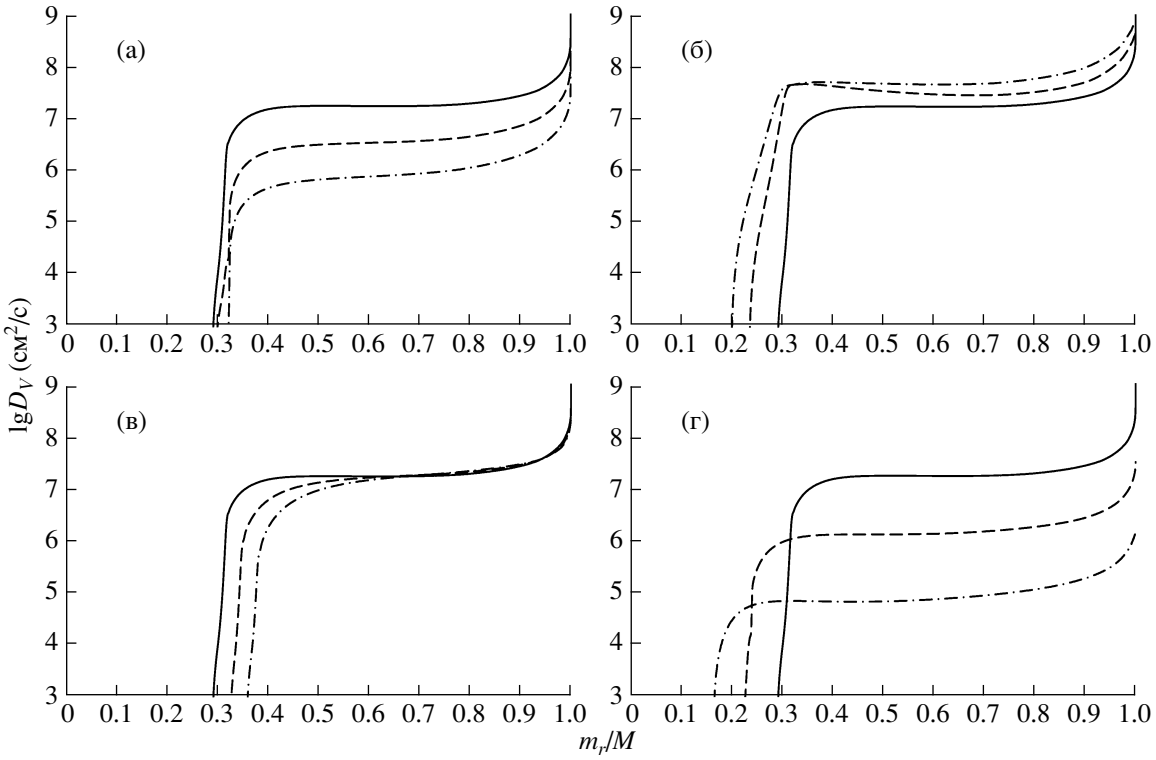

Рис. 1. Коэффициент диффузии D_V, обусловленный сдвиговой турбулентностью, в зависимости от текущей массы звезды m_r/M: (а) — в недрах звезды с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ (сплошная линия), $\mathrm{Sc}_t = 0.3$ (штриховая линия), $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ (штрих-пунктирная линия), S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ на момент времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.6$, (б) — в недрах звезды с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ на моменты времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.6$ (сплошная линия), $X_c \sim 0.4$ (штриховая линия), $X_c \sim 0.2$ (штрих-пунктирная линия), (в) — в недрах звезды с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ (сплошная линия), $\alpha_0 = 0.15$ (штриховая линия), $\alpha_0 = 0.25$ (штрих-пунктирная линия), на момент времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.6$, (г) — в недрах звезд с массами 8 $M_\odot$ (сплошная линия), 4 $M_\odot$ (штриховая линия) и 2 $M_\odot$ (штрих-пунктирная линия) в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ на момент времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.6$. Поведение коэффициента турбулентной диффузии в подповерхностном слое с массой $\sim 6 \times 10^{-4}$ $M_\odot$ не показано.

элементов выше, чем эффективность турбулентного переноса момента импульса. Поэтому турбулентное число Шмидта в таких течениях меньше единицы [51, 52]. Многочисленные экспериментальные и теоретические определения значений турбулентного числа Шмидта показали, что это число, будучи примерно постоянным в области развитой турбулентности течения со сдвигом, может меняться от течения к течению в пределах 0.1–1.0 в зависимости от наличия внешних силовых полей, градиентов температуры и плотности и полного количества примеси в потоке [65].

Коэффициент турбулентной диффузии в вертикальном направлении D_V в звезде с массой 8 $M_\odot$ имеет примерно постоянное значение в большей части области, охваченной сдвиговой турбулентностью. Значение коэффициента зависит от значения турбулентного числа Шмидта (рис. 1а) и времени эволюции (рис. 1б). В слое с переменным химическим составом коэффициент резко уменьшается, что связано с уменьшением характерного размера турбулентных элементов [53, 66]. Детальное поведение коэффициента в подповерхностном слое описано в подразделе 4.3.

Характерное время перемешивания t_{mix} в слое, заключенном между поверхностью постоянного давления, расположенной на среднем расстоянии r от центра звезды, и поверхностью звезды, находящейся на среднем расстоянии R, можно оценить по формуле [67]:

$$t_{\mathrm{mix}} \sim \frac{(R-r)^2}{6D_V(r)}.$$

Отношение характерного времени перемешивания t_{mix} к оставшемуся времени эволюции звезды с массой 8 $M_\odot$ на главной последовательности

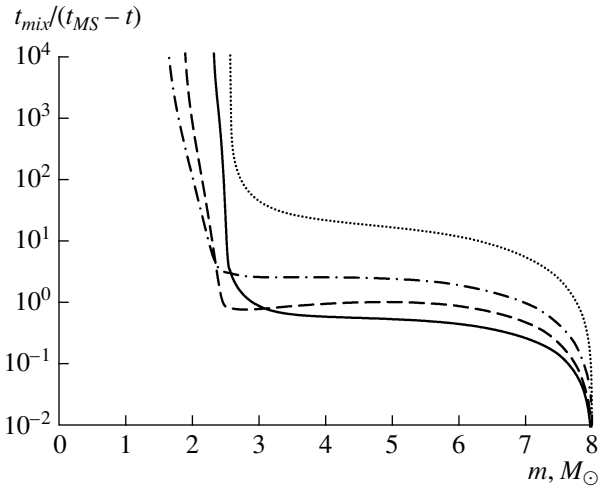

Рис. 2. Отношение характерного времени перемешивания вещества турбулентной диффузией $t_{\rm mix}$ к оставшемуся времени эволюции на главной последовательности $t_{MS}-t$ в недрах звезды с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ на моменты времени t, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.6$ (сплошная линия), $X_c \sim 0.4$ (штриховая линия), $X_c \sim 0.2$ (штрих-пунктирная линия) и в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ на момент времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.6$ (пунктирная линия). В полуконвективной зоне принят S-критерий нейтральности; $\alpha_0 = 0.05$.

$t_{MS}-t$ для различных значений турбулентного числа Шмидта и на различные моменты времени эволюции показано на рис. 2.

При $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ характерное время перемешивания в оболочке звезды совпадает по порядку величины с оставшимся временем эволюции в течение всего времени эволюции звезды на главной последовательности. По мере эволюции звезды характерное время перемешивания слегка увеличивается относительно оставшегося времени эволюции несмотря на увеличение коэффициента диффузии (рис. 1б). Это связано как с уменьшением оставшегося времени эволюции звезды, так и с увеличением размеров оболочки из-за ее расширения. В слое с переменным химическим составом характерное время перемешивания значительно превосходит время эволюции звезды на главной последовательности. Сдвиговая турбулентность осуществляет перенос массы водорода из первоначально химически однородной оболочки в верхнюю часть слоя с переменным химическим составом. Гелий, соответственно, переносится в противоположном направлении. В слое с переменным химическим составом турбулентный поток массы водорода сильно понижается (рис. 3а).

4.2. Роль полуконвекции

Вследствие увеличения содержания водорода в верхней части слоя с переменным химическим составом в этом месте могут появиться условия для развития полуконвекции. Нижняя граница полуконвективной зоны опускается внутрь звезды и может достичь границу области конвективной турбулентности. Время появления полуконвекции и возможность контакта полуконвективной зоны с областью конвективной турбулентности определяются массой водорода, поступающего в слой с переменным химическим составом из выше расположенных слоев звезды.

В звезде с массой 8 $M_\odot$ поток массы водорода в области сдвиговой турбулентности при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ больше, чем при $\mathrm{Sc}_t = 0.3$, поэтому условия для полуконвекции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ появляются раньше, при более высоком содержании водорода X_c^{beg} в области конвективной турбулентности, и нижняя граница полуконвективной зоны опускается внутрь звезды вплоть до границы области конвективной турбулентности тоже раньше, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности X_c^{cont} выше (таблица). После установления контакта полуконвективной зоны и области конвективной турбулентности водород из полуконвективной зоны поступает в область конвективной турбулентности, а гелий переносится в противоположном направлении. Таким образом, при $\mathrm{Sc}_t = \{0.1, 0.3\}$ и учете полуконвекции становится возможным частичное перемешивание вещества первоначально химически однородной лучистой оболочки с веществом из области конвективной турбулентности (рис. 3б).

При $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ характерное время перемешивания заметно больше времени эволюции звезды (рис. 2). Поток массы водорода в области сдвиговой турбулентности в этом случае невелик (рис. 3б). Вследствие сдвиговой турбулентности происходит незначительное перемешивание верхней части слоя с переменным химическим составом и нижней части химически однородной оболочки (рис. 4а). Условия для полуконвекции в слое с переменным химическим составом в этом случае не появляются.

При $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ содержание водорода в лучистой оболочке звезды с массой 8 $M_\odot$ со временем заметно понижается, а содержание гелия увеличивается вследствие частичного перемешивания вещества лучистой оболочки и области конвективной турбулентности (рис. 4б). Так как водород, поступающий в область конвективной турбулентности из лучистой оболочки звезды, преобразуется в ядерных реакциях в гелий, общая масса гелия в лучистой оболочке становится больше, чем она была бы без частичного перемешивания вещества. Увеличение

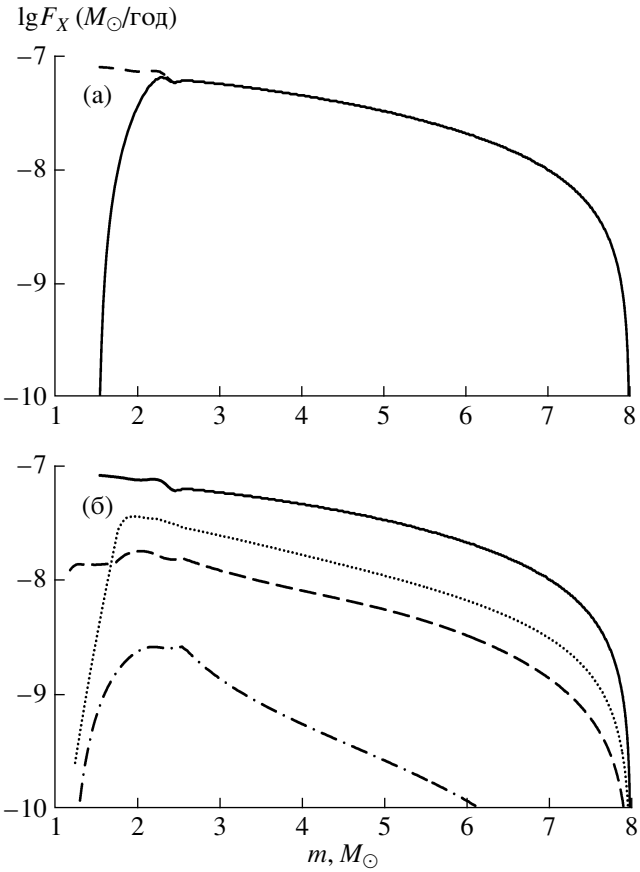

Рис. 3. Поток массы водорода F_X в недрах звезды с массой 8 $M_\odot$ на момент времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim 0.1$. (а) — Показан поток массы, обусловленный сдвиговой турбулентностью (сплошная линия), и суммарный поток массы в полуконвективной зоне, обусловленный сдвиговой турбулентностью и полуконвекцией (пунктирная линия) в случае эволюции, когда $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ и в полуконвективной зоне принят S-критерий нейтральности. (б) — Показан суммарный поток при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ (сплошная линия), $\mathrm{Sc}_t = 0.3$ (штриховая линия) и S-критерии нейтральности, а также поток, обусловленный сдвиговой турбулентностью, при $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ (штрих-пунктирная линия) и при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, когда перемешивание в полуконвективной зоне не учитывалось (пунктирная линия). Во всех случаях $\alpha_0 = 0.05$.

массы гелия в лучистой оболочке влечет увеличение прозрачности звездного вещества в оболочке и, следовательно, увеличение светимости звезды. Соответственно, область в центре звезды, где выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости, охватывает бóльшую массу вещества [66]. Масса вещества в области конвективной турбулентности становится больше, чем в случае когда частичное перемешивание вещества этой области и лучистой оболочки не учитывается, причем разница в массах вещества в области конвективной турбулентности в двух этих случаях нарастает со временем в процессе эволюции звезды.

Увеличение массы вещества в области конвективной турбулентности и поступление водорода в эту область из лучистой оболочки увеличивают массу синтезированного гелия и продолжительность эволюции звезды на главной последовательности. В звезде с массой 8 $M_\odot$ дно полуконвективной зоны достигает границу области конвективной турбулентности при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ значительно раньше, чем при $\mathrm{Sc}_t = 0.3$, поэтому масса синтезированного гелия ΔM_{He} и продолжительность эволюции на главной последовательности t_{MS} при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ значительно больше (таблица).

Один вариант эволюции звезды с массой 8 $M_\odot$ рассчитан при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ без учета перемешивания вещества в полуконвективной зоне. Так как поток массы водорода в области сдвиговой турбулентности при таком значении числа Шмитда достаточно большой (рис. 3б), то происходит перемешивание вещества лучистой оболочки и верхней части слоя с переменным химическим составом (рис. 4в). Водород из лучистой оболочки в рассматриваемом случае в область конвективной турбулентности не попадает, количество ядерного топлива для об-

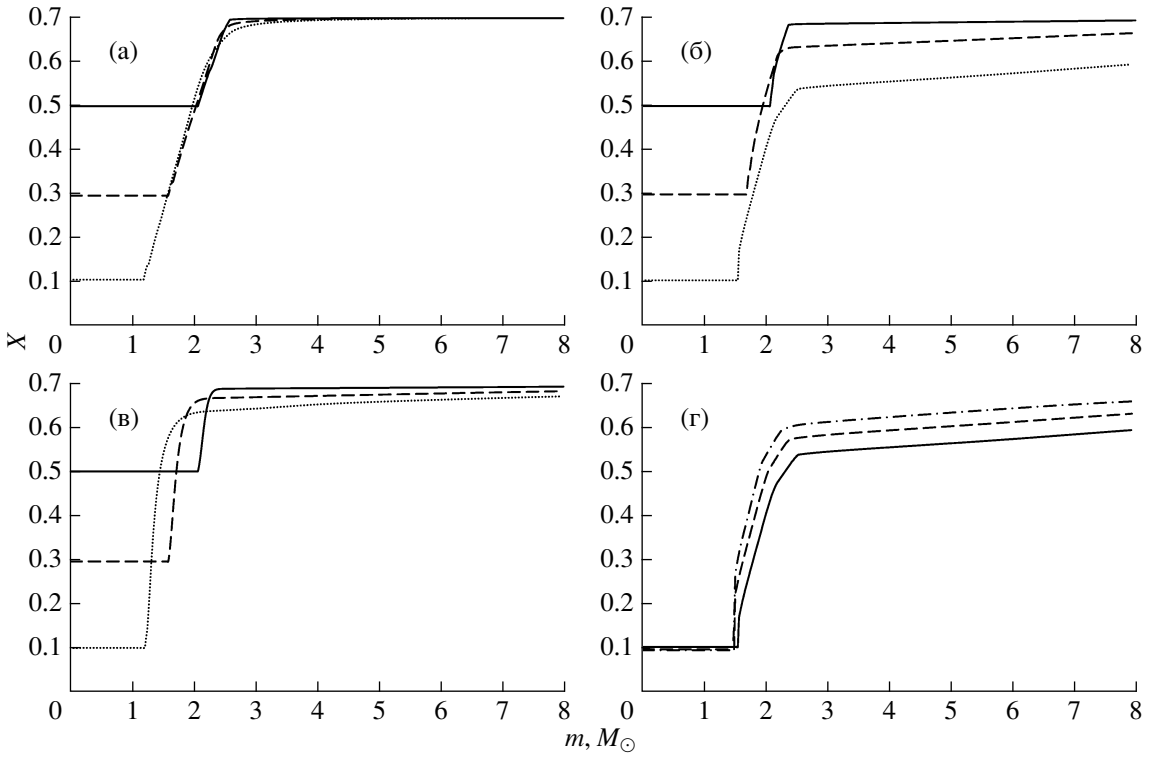

Рис. 4. (а, б, в) — Распределение содержания водорода в звезде с массой 8 $M_\odot$ для трех различных моментов времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности X_c составляет ~0.5 (сплошная линия), ~0.3 (штриховая линия) и ~0.1 (штрих-пунктирная линия), в случае эволюции при: (а) — $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ и $\alpha_0 = 0.05$, (б) — $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии нейтральности в полуконвективной зоне и $\alpha_0 = 0.05$, (в) — $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ без учета перемешивания в полуконвективной зоне и $\alpha_0 = 0.05$. (г) — Распределение содержания водорода в звезде с массой 8 $M_\odot$ для момента времени, когда $X_c \sim 0.1$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии нейтральности в полуконвективной зоне и $\alpha_0 = 0.05$ (сплошная линия), $\alpha_0 = 0.15$ (штриховая линия), $\alpha_0 = 0.25$ (штрих-пунктирная линия).

разования гелия не возрастает. Содержание гелия во внешних слоях звезды, расположенных над областью конвективной турбулентности, перераспределяется, но полная масса гелия в этих слоях такая же как в случае, когда частичного перемешивания вещества нет. Масса вещества в области, где выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости, меняется со временем так же, как в случае, когда перемешивание вещества происходит только в области конвективной турбулентности. Поэтому масса синтезированного гелия и время эволюции на главной последовательности в рассматриваемом случае и в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ одинаковые (таблица). Однако эти два варианта эволюции отличаются распределением водорода и гелия в лучистой оболочке звезды (рис. 4а и 4в).

В результате действия сдвиговой турбулентности во внешних слоях звезды происходит перенос гелия к поверхности звезды. При $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ волна диффузии достигает поверхность звезды примерно в середине ее эволюции на главной последовательности (рис. 5). В случае, когда перемешивание вещества в полуконвективной зоне не учитывается, отношение концентраций гелия и водорода $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ в веществе на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ возрастает к концу эволюции на главной последовательности на ~15%. Это отношение возрастает за то же время на ~26%, если перемешивание в полуконвективной зоне учтено. Строение звезды на рассматриваемый момент времени в этих двух вариантах эволюции разное. В случае, когда полуконвекция не учтена, в центральной части звезды находится только что образовавшееся гелиевое ядро. В случае, когда полуконвекция учтена, звезда все еще находится на стадии горения водорода, и содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет ~0.24. Так как учет частичного перемешивания вещества лучистой оболочки и области конвективной турбулентности увеличивает продолжительность эволюции звезды на главной последовательности, то отношение $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ продолжает увеличиваться в дополнительное время и к концу эволюции на главной последовательности достигает ~80% (рис. 5).

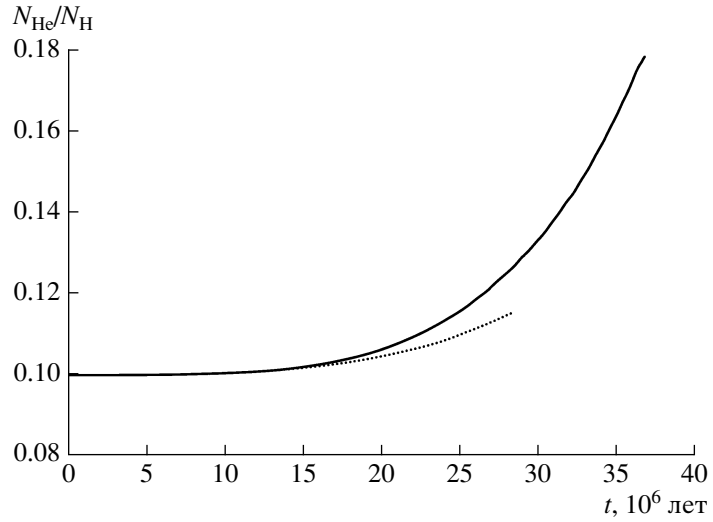

Рис. 5. Изменение отношения концентраций гелия и водорода на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ со временем ее эволюции на главной последовательности в случае, когда в полуконвективной зоне принят S-критерий нейтральности (сплошная линия), и в случае, когда перемешивание в полуконвективной зоне не учитывается (пунктирная линия). В обоих случаях $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ и $\alpha_0 = 0.05$.

4.3. Роль потери массы

Поведение угловой скорости вращения в подповерхностном слое звезды зависит от ее момента импульса. При относительно небольших значениях момента импульса угловая скорость вращения монотонно убывает от границы области конвективной турбулентности до поверхности звезды. При относительно больших значениях момента импульса угловая скорость вращения достигает минимального значения под поверхностью звезды и незначительно увеличивается по направлению к поверхности в подповерхностном слое звезды [54, 62]. Если момент импульса имеет промежуточное значение, то в начале эволюции на главной последовательности положение минимума угловой скорости вращения совпадает с поверхностью звезды, но со временем оно смещается под поверхность.

В рассматриваемом случае вращения звезды с массой 8 $M_\odot$ со скоростью вращения на экваторе в начале эволюции 250 км/с момент импульса попадает в область промежуточных значений. В случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, учете перемешивания вещества в полуконвективной зоне и $\alpha_0 = 0.05$ минимальное значение угловой скорости вращения смещается под поверхность звезды при возрасте $\sim$19 млн. лет (содержание водорода в области конвективной турбулентности $X_c \sim 0.43$). Увеличение отношения $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ к этому моменту времени составляет $\sim$1.5%. В течение последующей эволюции звезды положение минимального значения угловой скорости вращения продолжает незначительно смещаться внутрь звезды. Коэффициент турбулентной диффузии обращается в ноль на поверхности постоянного давления, вращающейся с минимальной угловой скоростью (рис. 6). Перемешивание вещества происходит во внутренних слоях звезды вплоть до этой поверхности. Масса подповерхностного слоя ΔM_{up}, в котором угловая скорость вращения увеличивается наружу, возрастает со временем и к концу эволюции на главной последовательности достигает $\sim 5.0 \times 10^{-4}\ M_\odot$. В результате смещения положения минимального значения угловой скорости вращения внутрь звезды перемешанные слои попадают в подповерхностный слой. Коэффициент турбулентной диффузии в этом слое имеет достаточно большое значение (рис. 6б), поэтому химический состав в подповерхностном слое выравнивается практически до однородного. Если звезда теряет вещество с низким темпом, может образоваться перепад в химическом составе вещества, расположенного под и над поверхностью постоянного давления, вращающейся с минимальной скоростью (рис. 6в). Подповерхностный слой будет перемешан меньше, чем вещество, находящееся под ним. В случае, когда потеря массы не учитывается, отношение $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ в веществе на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ увеличивается в рассматриваемом случае до $\sim$23% к концу эволюции на главной последовательности.

При учете потери массы согласно [58], темп потери массы у звезды с массой 8 $M_\odot$ увеличивается от $2.1 \times 10^{-11}\ M_\odot$/год в начале эволюции на главной последовательности до 2.7×10^{-10}–$1.9 \times 10^{-9}\ M_\odot$/год в конце в зависимости от варианта эволюции (рис. 7). Суммарная масса вещества ΔM_{lost}, потерянного звездой за время

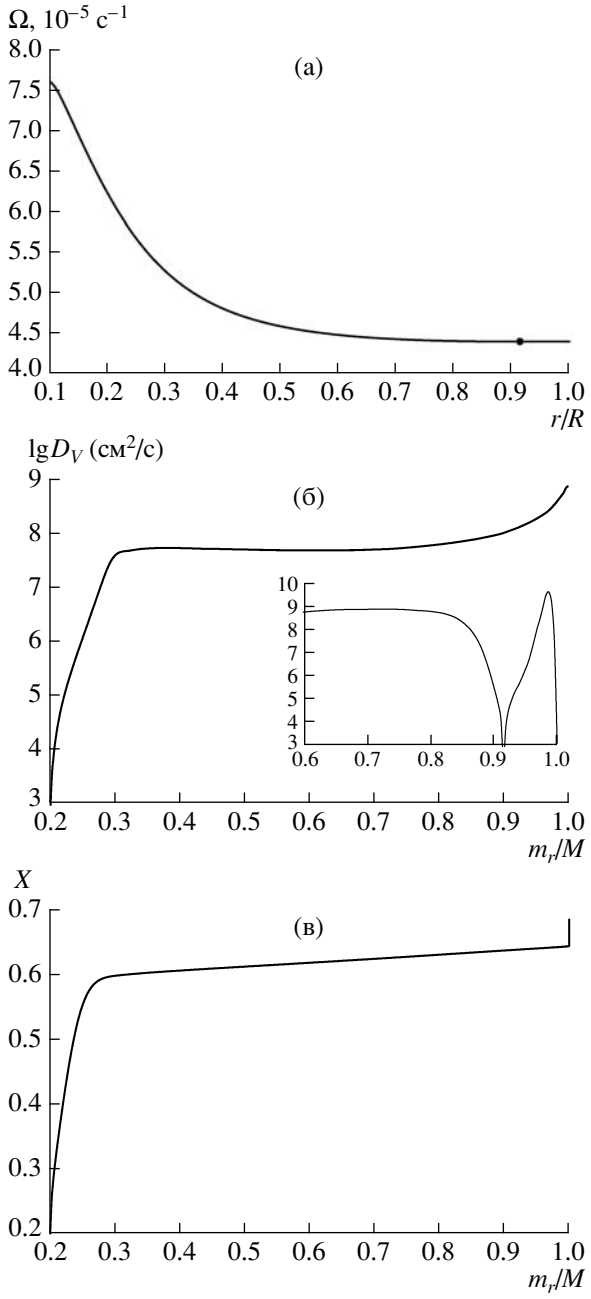

Рис. 6. Распределение физических характеристик в слоях звезды с массой 8 $M_\odot$, расположенных за пределами области конвективной турбулентности, на момент времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности составляет $X_c \sim$ ~ 0.2: (а) — угловая скорость вращения (минимальное значение угловой скорости помечено кружком), (б) — коэффициент турбулентной диффузии в вертикальном направлении (детальное поведение коэффициента в подповерхностном слое с массой $\sim$0.06 $M_\odot$ показано на врезке в зависимости от относительного расстояния до центра звезды r/R; значения $D_V < 10^3$ не показаны), (в) — содержание водорода по массе. Расчеты проведены при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$. Потеря массы со звездным ветром не учтена.

эволюции на главной последовательности, не превышает 0.15% от полной массы звезды (таблица). Время $\Delta M_{up}/\dot{M}$, необходимое для потери подповерхностного слоя с массой ΔM_{up}, увеличивается, начиная с момента смещения положения минимума угловой скорости вращения под поверхность звезды, и достигает 26×10^4 лет к концу эволюции на главной последовательности. Это время значительно меньше оставшегося времени эволюции на главной последовательности в течение всего времени эволюции звезды на главной последовательности (рис. 8). Поэтому перепад в химическом составе вещества между подповерхностным слоем и ниже расположенными слоями в звезде с массой 8 $M_\odot$ не образуется (рис. 4).

4.4. Роль турбулентной эрозии

Закон турбулентной эрозии дает возможность проследить за относительной эволюцией толщины слоя, заключенного между границами областей локальной конвективной неустойчивости и конвективной турбулентности (рис. 9). Толщина слоя d убывает со временем в процессе эволюции звезды потому, что скачок плавучести на границе области конвективной турбулентности увеличивается заметно быстрее, чем характерное значение турбулентных пульсаций скорости [43]. Толщина этого слоя убывает быстрее, чем высота шкалы по давлению H_P, определяемая на границе области локальной конвективной неустойчивости. Поэтому параметр $\alpha = d/H_P$ убывает со временем (рис. 9).

Параметр A в законе турбулентной эрозии может принимать различные значения в зависимости от условий, в которых осуществляется конвективное течение [57]. Чем больше значение параметра A, тем больше значение α в начале эволюции звезды. В случае эволюции звезды, когда перемешивание вещества учитывается только в области конвективной турбулентности, масса гелия, синтезированного на главной последовательности, тем больше, чем больше α_0 [43]. В случае, когда учитывается интенсивное перемешивание вещества в области сдвиговой турбулентности и перенос водорода из этой области в область конвективной турбулентности, это уже не так. В начале эволюции на главной последовательности слой с переменным химическим составом при больших α_0 располагается дальше от центра звезды. Условия для полуконвекции появляются в этом случае позже, поэтому контакт полуконвективной области с областью конвективной турбулентности достигается на более поздних стадиях эволюции звезды на главной последовательности, притом тем позже, чем больше α_0 (таблица). Частичное перемешивание вещества лучистой оболочки и области конвективной турбулентности начинает действовать раньше и действует дольше при меньших значениях α_0. Масса

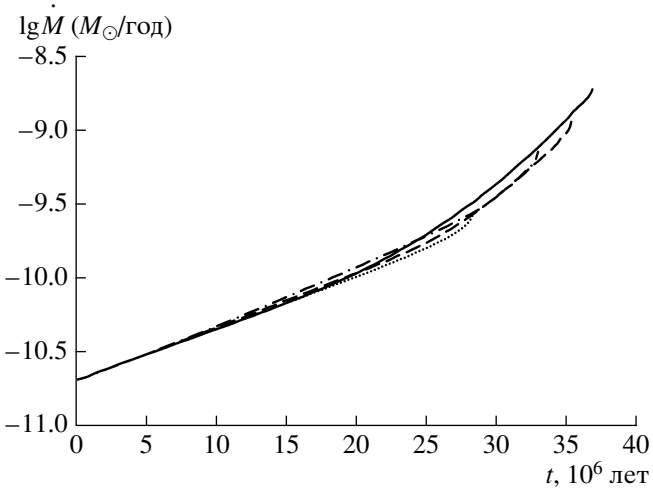

Рис. 7. Темп потери массы со звездным ветром $\dot{M}$ в зависимости от времени эволюции на главной последовательности в звезде с массой 8 $M_\odot$ для следующих вариантов эволюции: сплошная линия — $(\mathrm{Sc}_t, \alpha_0) = (0.1, 0.05)$, штриховая линия — $(\mathrm{Sc}_t, \alpha_0) = (0.1, 0.15)$, штрих-пунктирная линия — $(\mathrm{Sc}_t, \alpha_0) = (0.1, 0.25)$, пунктирная линия — $(\mathrm{Sc}_t, \alpha_0) = (1.0, 0.05)$. Во всех случаях принят S-критерий для полуконвекции.

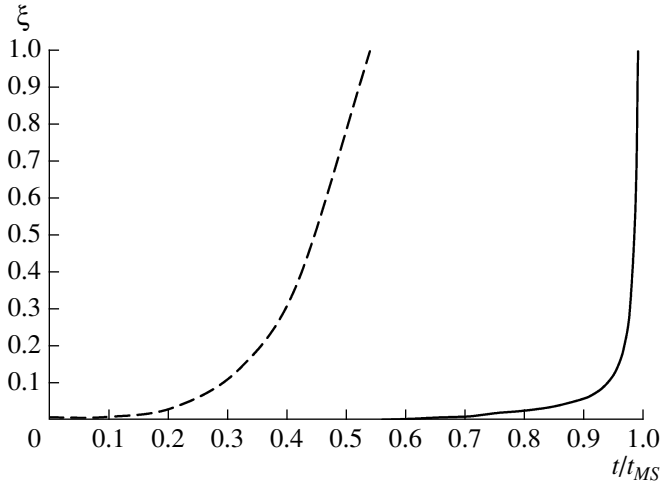

Рис. 8. Отношение времени, необходимого для потери внешнего слоя звезды с массой ΔM_{up}, в котором угловая скорость вращения возрастает наружу, к оставшемуся времени эволюции на главной последовательности $\xi = (\Delta M_{up}/\dot{M})/(t_{MS} - t)$ в зависимости от относительного времени эволюции на главной последовательности t/t_{MS} в звездах с массами 8 $M_\odot$ (сплошная линия) и 4 $M_\odot$ (штриховая линия) в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$.

водорода, перенесенного за время эволюции на главной последовательности из лучистой оболочки звезды в область конвективной турбулентности, получается больше при меньших значениях α_0. Полная масса гелия, синтезированного на главной последовательности, также больше при меньших значениях α_0. Увеличение массы гелия во внешних слоях звезды способствует как увеличению светимости звезды и более слабому уменьшению массы вещества в области, где выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости, так и возрастанию интенсивности полуконвекции. Поэтому к концу эволюции на главной последовательности слой с переменным химическим составом находится тем дальше от центра звезды, чем меньше значение α_0 (рис. 4г).

4.5. Частичное перемешивание вещества в зависимости от массы звезды

При уменьшении массы звезды в 2 раза коэффициент турбулентной диффузии уменьшается на порядок (рис. 1г), а продолжительность эволюции

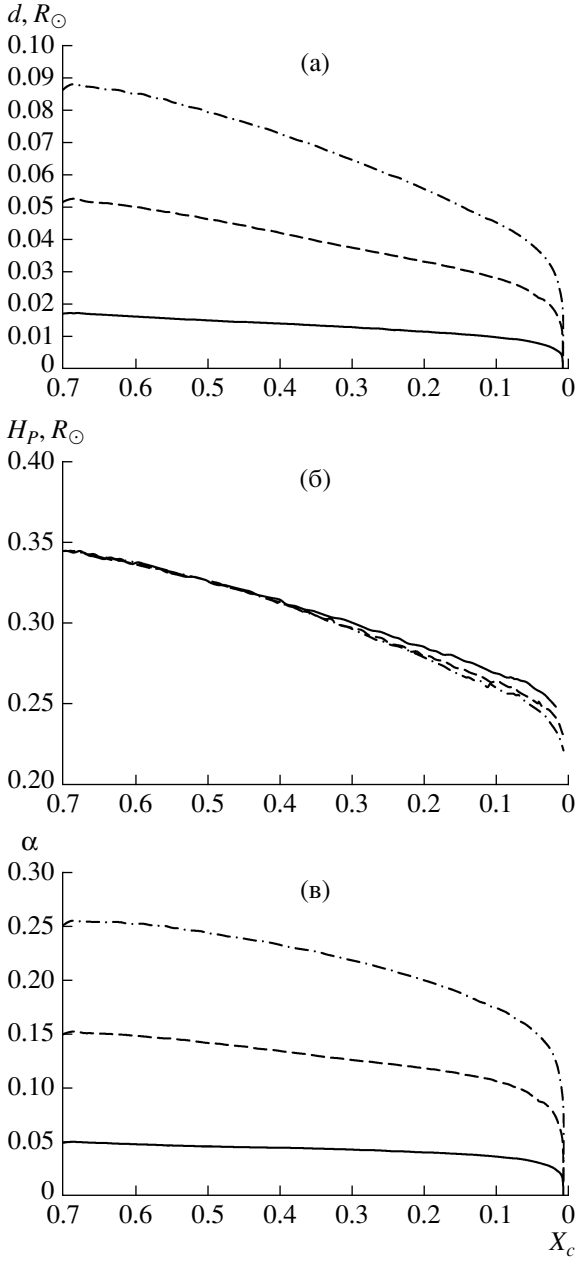

Рис. 9. (а) — Толщина d слоя, который расположен над областью, где выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости, и который перемешивается вследствие действия турбулентной эрозии. (б) — Высота шкалы по давлению H_P на границе области, в которой выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости. (в) — Параметр $\alpha = d/H_P$ в зависимости от содержания водорода в области конвективной турбулентности X_c в звезде с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ (сплошная линия), $\alpha_0 = 0.15$ (штриховая линия), $\alpha_0 = 0.25$ (штрих-пунктирная линия).

звезды на главной последовательности увеличивается в ~3–6 раз (таблица). Поэтому при фиксированных параметрах модели частичного перемешивания вещества, интенсивность перемешивания в области сдвиговой турбулентности уменьшается с уменьшением массы звезды. Содержание водорода в слое с переменным химическим составом у менее массивной звезды должно возрасти сильнее для появления условий для полуконвекции по сравнению с более массивной звездой. Таким образом, условия для полуконвекции появляются тем позже в процессе эволюции звезды, чем меньше ее масса. Контакт полуконвективной зоны и области конвективной турбулентности так же наступает позже у звезды с меньшей массой (таблица). Доля, приходящаяся на массу вещества в области конвективной турбулентности, уменьшается с понижением массы звезды, а доля, приходящаяся на массу вещества во внешних слоях, соответственно, возрастает. В результате, увеличение содержания гелия во внешних слоях звезды при фиксированных параметрах модели перемешивания вещества тем меньше, чем меньше масса звезды (рис. 10).

В рассматриваемом случае вращения звезд с массами 2 и 4 $M_\odot$, когда скорость вращения звезды на экваторе в начале эволюции на главной последовательности составляет 250 км/с, угловая скорость вращения имеет минимальное значение под поверхностью звезды в течение всего времени эволюции на главной последовательности. Масса подповерхностного слоя, в котором угловая скорость вращения увеличивается наружу, меняется от $\sim 0.1 \times 10^{-4}$ $M_\odot$ в начале эволюции звезды с массой 4 $M_\odot$ на главной последовательности до $\sim 4.1 \times 10^{-4}$ $M_\odot$ в конце эволюции. Отношение концентраций гелия и водорода в веществе, находящемся под этим слоем, увеличивается к концу эволюции на главной последовательности на ~22% при принятых параметрах модели перемешивания. Оценка возможности потери подповерхностного слоя сделана для темпа потери массы 1.0×10^{-12} $M_\odot$/год, близкого к нижнему пределу согласно [38]. Характерное время, необходимое для потери подповерхностного слоя, меньше оставшегося времени эволюции на главной последовательности только в течение первой половины эволюции звезды на главной последовательности (рис. 8), когда волна диффузии еще не достигла поверхности звезды. В течение второй половины эволюции звезды на главной последовательности, когда волна диффузии выходит на поверхность звезды, время, необходимое для потери подповерхностного слоя, становится больше оставшегося времени эволюции на главной последовательности. Поэтому между подповерхностным и ниже лежащими слоями образуется скачок в содержании гелия (рис. 10). Увеличение поверхностного отношения $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ к концу эволюции на главной последовательности составляет ~12%. Если бы темп потери массы

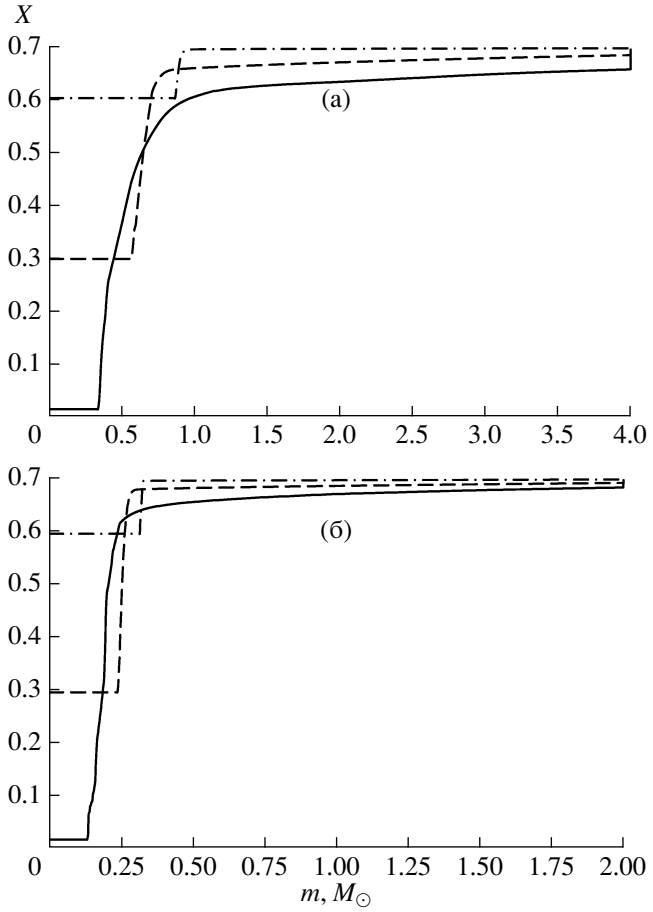

Рис. 10. Распределение содержания водорода для трех различных моментов времени, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности X_c составляет $\sim$0.60 (штрих-пунктирная линия), $\sim$0.30 (штриховая линия) и $\sim$0.02 (сплошная линия), в звездах с массой 4 $M_\odot$ (а) и 2 $M_\odot$ (б). В обоих случаях $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, в полуконвективной зоне принят S-критерии нейтральности, $\alpha_0 = 0.05$.

увеличивался за время эволюции на главной последовательности более, чем на порядок, как у звезды с массой 8 $M_\odot$, то подповерхностный слой терялся бы быстрее и скачок в содержании гелия между этим и ниже расположенными слоями не мог бы образоваться. Для определения изменения поверхностного содержания гелия в звезде с массой 4 $M_\odot$ со временем необходимо знать, как темп потери массы меняется с изменением эффективной температуры и светимости звезды вблизи нижней границы области существования звездного ветра.

Звезда с массой 2 $M_\odot$ не имеет звездного ветра. Масса внешнего слоя, в котором угловая скорость вращения увеличивается наружу, возрастает за время эволюции на главной последовательности от $\sim 1.6 \times 10^{-4}$ до $\sim 8.3 \times 10^{-4}$ $M_\odot$. Отношение концентраций гелия и водорода в веществе, расположенном под этим слоем, возрастает к концу эволюции на главной последовательности на $\sim$8%, а в самом слое — на $\sim$2%.

5. О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В ВЕЩЕСТВЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОДКЛАССОВ B0–B5

Рассмотрим возможность увеличения поверхностного содержания гелия в B-звездах главной последовательности ранних спектральных подклассов в зависимости от условий перемешивания в их недрах и от потери массы со звездным ветром.

А. *Вариант слабого перемешивания вещества в области сдвиговой турбулентности.* При слабом перемешивании вещества в лучистой оболочке звезды количество водорода, поступающего в слой с переменным химическим составом, мало. В этом варианте эволюции звезды условия для полуконвекции не появляются совсем, как в случае $\mathrm{Sc}_t = 1.0$, либо частичное перемешивание вещества лучистой оболочки и области конвективной турбулентности становится возможным лишь

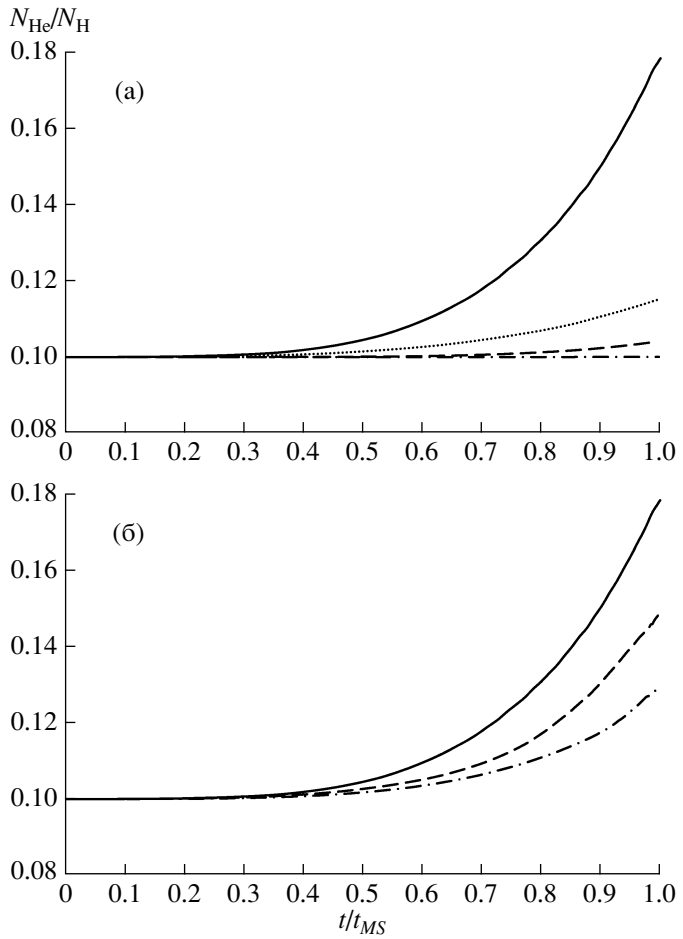

Рис. 11. Изменение отношения концентраций гелия и водорода на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ со временем ее эволюции на главной последовательности: (а) — в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ (сплошная линия), $\mathrm{Sc}_t = 0.3$ (штриховая линия), $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ (штрих-пунктирная линия), S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$, а также при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ без учета полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ (пунктирная линия), (б) — в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии для полуконвекции и $\alpha_0 = 0.05$ (сплошная линия), $\alpha_0 = 0.15$ (штриховая линия), $\alpha_0 = 0.25$ (штрих-пунктирная линия).

незадолго до окончания эволюции на главной последовательности. Например, при $\mathrm{Sc}_t = 0.3$ частичное перемешивание вещества лучистой оболочки и области конвективной турбулентности в звезде с массой 8 $M_\odot$ начинает осуществляться, когда содержание водорода в области конвективной турбулентности уже снизилось до $X_c \sim 0.20$ (таблица). Увеличение $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ за время эволюции на главной последовательности составляет $\sim$0.03% при $\mathrm{Sc}_t = 1.0$ и $\sim$4.2% при $\mathrm{Sc}_t = 0.3$ (рис. 11а). Это меньше, чем наблюдается [13, 14].

Б. *Вариант без учета полуконвекции.* В этом варианте эволюции возможно перемешивание первоначально химически однородной лучистой оболочки звезды и слоя с переменным химическим составом. Отношение концентраций гелия и водорода $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ в веществе на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, без учета полуконвекции и при $\alpha_0 = 0.05$ увеличивается к концу эволюции на главной последовательности на $\sim$15% (рис. 11а). Это значение согласуется с данными наблюдений [13, 14]. Однако в этом варианте эволюции содержание водорода в слоях звезды, расположенных над областью конвективной турбулентности, получается достаточно большим: $X \sim 0.5$–0.6 (рис. 4в). Аналогичное содержание водорода может образоваться над конвективным ядром аккретора в случае АВ обмена веществом в тесных двойных системах из-за увеличения массы конвективного ядра в процессе аккреции [68]. При таком большом содержании водорода бóльшая часть энергии на стадии горения гелия выделяется в слоевом источнике горения водорода, а масса гелиевого ядра увеличивается ненамного. По этой причине аккретор на стадия горения гелия имеет характеристики голубого сверхгиганта. Аналогично, в рассматриваемом варианте эволюции звезда с массой 8 $M_\odot$ на протяжении всей стадии

горения гелия в центре или большей части ее будет иметь характеристики голубого гиганта.

В. *Вариант сильного перемешивания вещества в области сдвиговой турбулентности с учетом полуконвекции.* В этом варианте эволюции происходит частичное перемешивание вещества лучистой оболочки звезды и области конвективной турбулентности. В результате меняются характеристики эволюции звезды на главной последовательности и происходит вынос гелия из центральных частей звезды наружу. При $\mathrm{Sc}_t = 0.1$ и S-критерии нейтральности в полуконвективной зоне отношение $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ в веществе на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ увеличивается к концу эволюции на главной последовательности на $\sim$80% при $\alpha_0 = 0.05$, $\sim$50% при $\alpha_0 = 0.15$ и $\sim$30% при $\alpha_0 = 0.25$ (рис. 11б). В случаях $\alpha_0 = \{0.05, 0.15\}$ рассчитанное увеличение содержания гелия на поверхности звезды превышает наблюдаемое. Увеличение массы синтезированного гелия так же велико: $\sim$60–85%. При $\alpha_0 = 0.25$ рассчитанное увеличение содержания гелия на поверхности звезды совпадает с наблюдаемым [13, 14]. Увеличение массы синтезированного гелия в этом случае составляет $\sim$40% (таблица) и либо соответствует увеличению, необходимому для объяснения наблюдаемого распределения звезд рассеянных скоплений на диаграмме Герцшпрунга–Рессела [24], либо слегка больше. Так как содержание водорода в этом варианте эволюции плавно возрастает наружу над областью конвективной турбулентности благодаря действию полуконвекции (рис. 4г), то после окончания эволюции на главной последовательности звезда приобретет характеристики красного гиганта.

Г. *Вариант без потери массы.* Отношение концентраций гелия и водорода $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ в веществе на поверхности звезды с массой 8 $M_\odot$ в случае эволюции при $\mathrm{Sc}_t = 0.1$, S-критерии в полуконвективной зоне, $\alpha_0 = 0.05$ и без учета потери массы увеличивается к концу эволюции на главной последовательности на $\sim$23%. Полученное увеличение $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ согласуется с данными наблюдений [13, 14]. В этом варианте эволюции содержание гелия в подповерхностном слое, в котором угловая скорость вращения увеличивается наружу, повышается в процессе эволюции звезды вследствие смещения положения минимума угловой скорости вращения внутрь звезды и включения в подповерхностный слой расположенных под ним перемешанных слоев. Для того чтобы содержание гелия в подповерхностном слое увеличилось в соответствии с данными наблюдений, вещество, находящееся под слоем, должно быть сильно перемешано с веществом из центральной области звезды. В рассматриваемом варианте эволюции звезды с массой 8 $M_\odot$ такое перемешивание приводит к увеличению массы синтезированного гелия на $\sim$85%, что, по-видимому, намного больше, чем требуется для объяснения наблюдаемой ширины главной последовательности рассеянных скоплений [24]. Вариант эволюции без потери массы не подходит для объяснения повышенного содержания гелия в атмосферах проэволюционировавших B-звезд главной последовательности.

Суммарная потеря массы со звездным ветром за время эволюции на главной последовательности у B-звезд ранних спектральных подклассов незначительна. Потеря массы не влияет на строение и эволюцию этих звезд, как это имеет место у ярких звезд спектрального класса O. Однако изменение поверхностного содержания гелия со временем определяется не только процессами перемешивания в недрах B-звезд, но и скоростью потери массы из внешнего слоя звезды, в котором угловая скорость вращения возрастает наружу. Масса такого слоя определяется моментом импульса звезды [54, 62] и составляет по порядку величины 10^{-4}–10^{-3} $M_\odot$. Как показали расчеты эволюции звезды с массой 8 $M_\odot$ и моментом импульса 6.94×10^{51} эрг с, время потери такого слоя вследствие наличия ветра у звезд спектральных подклассов B0–B2 значительно меньше времени эволюции на главной последовательности. В этом случае химический состав вещества подповерхностного слоя такой же, как у нижележащих слоев. У звезд спектральных подклассов B3–B5 темп потери массы значительно ниже, поэтому внешний слой звезды может оказаться менее перемешанным. Отношение $N_{\mathrm{He}}/N_{\mathrm{H}}$ в подповерхностном слое звезды с массой 4 $M_\odot$ и моментом импульса 2.02×10^{51} эрг с увеличивается к концу эволюции на главной последовательности на $\sim$12%, а в нижележащих слоях – на $\sim$22%, в случае, когда темп потери массы задавался равным минимально возможному значению. Результирующее изменение поверхностного содержания гелия у звезд спектральных подклассов B3–B5 определяется, таким образом, и тем, с каким темпом звезды теряют массу. К сожалению, разреженный ветер звезд вблизи нижнего предела существования ветра до сих пор плохо изучен [37].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение поверхностного содержания гелия в B-звездах главной последовательности раннего спектрального подкласса может происходить в результате частичного перемешивания вещества лучистой оболочки и области конвективной турбулентности, расположенной в центральной части вращающейся звезды, и потери массы со звездным

ветром. Такое частичное перемешивание возможно, если в слое переменного химического состава, расположенного над областью конвективной турбулентности, появляются условия для полуконвекции вследствие поступления водорода в этот слой из лучистой оболочки в результате действия сдвиговой турбулентности. Сдвиговая турбулентность и полуконвекция являются основными механизмами частичного перемешивания вещества в недрах вращающихся звезд. Результат частичного перемешивания зависит также от того, насколько размер области, охваченной конвективной турбулентностью, превышает размер области, в которой выполняется локальный критерий конвективной неустойчивости.

Увеличение поверхностного содержания гелия зависит также от скорости потери массы со звездным ветром. Так как минимум угловой скорости вращения, в котором коэффициент турбулентной диффузии обращается в ноль, находится под поверхностью звезды, внешний слой звезды может оказаться менее перемешанным, если скорость потери массы невелика. Поверхностное отношение концентраций гелия и водорода увеличивается к концу эволюции звезды с массой 8 $M_\odot$ на главной последовательности на $\sim$30% при оптимальном выборе параметров модели перемешивания и учете потери массы со звездным ветром с наблюдаемыми темпами. Аналогичное увеличение у звезды с массой 4 $M_\odot$ может составлять от $\sim$12 до $\sim$22% в зависимости от темпов потери массы вблизи нижней границы существования звездного ветра.

У звезды с массой 2 $M_\odot$ и моментом импульса 0.55×10^{51} эрг с увеличение отношения $N_{\rm He}/N_{\rm H}$ к концу эволюции на главной последовательности составляет $\sim$2% в подповерхностном слое и $\sim$8% под этим слоем. С учетом погрешности определения содержания гелия по данным наблюдений, изменение поверхностного содержания гелия в звездах таких масс может быть необнаружимо. Верхний менее перемешанный слой в отсутствие звездного ветра может маскировать процессы перемешивания в недрах таких звезд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Г. Масевич, А. В. Тутуков, *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М.: Наука, 1988).
2. Г. С. Бисноватый-Коган, *Физические вопросы теории звездной эволюции* (М.: Наука, 1989).
3. G. S. Bisnovatyi-Kogan, *Stellar Physics. I. Fundamental Concepts and Stellar Equilibrium* (Heidelberg: Springer, 2001).
4. M. Asplund, N. Grevesse, and A. J. Sauval, in: *Cosmic Abundances as Record of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, eds F. N. Bash and T. G. Barnes, ASP Conf. Ser. **336**, 25 (2005).
5. J. C. Howk, K. R. Sembach, and B. D. Savage, Astrophys. J. **543**, 278 (2000).
6. C. R. Proffitt and M. F. Quigley, Astrophys. J. **548**, 429 (2001).
7. K. A. Venn, A. M. Brooks, D. L. Lambert, M. Lemke, N. Langer, and D. J. Lennon, Astrophys. J. **565**, 571 (2002).
8. J. T. Mendel, K. A. Venn, and C. R. Proffitt, Astrophys. J. **640**, 1039 (2006).
9. J. Fliegner, N. Langer and K. A. Venn, Astron. and Astrophys. **308**, L13 (1996).
10. Л.С. Любимков, Письма в Астрон. журн. **1**, 29 (1975).
11. Л.С. Любимков, в сб.: *Химическая эволюция звезд и галактик* (М.: Космосинформ, 1992), с. 64.
12. Л.С. Любимков, *Химический состав звезд: метод и результаты анализа* (Одесса: Астропринт, 1995).
13. L. S. Lyubimkov, S. I. Rostopchin, and D. L. Lambert, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **351**, 745 (2004).
14. W. Huang and D. R. Gies, Astrophys. J. **648**, 591 (2006).
15. A. Herrero, R. P. Kudritzki, J. M. Vilchez, D. Kunze, K. Butler, and S. Haser, Astron. and Astrophys. **261**, 209 (1992).
16. A. Herrero, L. J. Corral, M. R. Villamaris, and E. L. Martin, Astron. and Astrophys. **348**, 542 (1999).
17. A. Herrero, J. Puls, and M. R. Villamaris, Astron. and Astrophys. **354**, 193 (2000).
18. K. Hunger and D. Groote, Astron. and Astrophys. **351**, 554 (1999).
19. J. I. Castor, D. C. Abbott, and R. I. Klein, Astrophys. J. **195**, 157 (1975).
20. J. Krtička and J. Kubát, Astron. and Astrophys. **369**, 222 (2001).
21. J. Krtička and J. Kubát, Astron. and Astrophys. **377**, 175 (2001).
22. J. Krtička, J. Kubát, and D. Groote, Astron. and Astrophys. **460**, 145 (2006).
23. A. Maeder, Astron. and Astrophys. **32**, 177 (1974).
24. A. Maeder and J.-C. Mermilliod, Astron. and Astrophys. **93**, 136 (1981).
25. G. Meylan and A. Maeder, Astron. and Astrophys. **108**, 148 (1982).
26. J.-C. Mermilliod and A. Maeder, Astron. and Astrophys. **158**, 45 (1986).
27. C. A. Meakin and D. Arnett, Astrophys. J. **667**, 448 (2007).
28. M. Schwarzshild and R. Harm, Astrophys. J. **128**, 348 (1958).
29. A. S. Eddington, Observatory **48**, 73 (1925).
30. H. Vogt, Astron. Nachr. **223**, 229 (1925).
31. J.-P. Zahn, Astron. and Astrophys. **265**, 115 (1992).
32. S. Ekström, G. Georgy, P. Eggenberger, G. Meynet, Mowlavi, N. Mowlavi, A. Wyttenbach, A. Granada, T. Decressin, R. Hirschi, U. Frischknecht, C. Charbonnel, and A. Maeder, Astron. and Astrophys. **537**, 146 (2012).

33. U. Frischknecht, R. Hirsci, G. Meynet, S. Ekström, C. Georgy, T. Rauscher, C. Winteler, and F.-K. Thielemann, Astron. and Astrophys. **522**, 39 (2010).
34. N. Przybilla, M. Firnstein, M. F. Nieva, G. Meynet, and A. Maeder, Astron. and Astrophys. **517**, 38 (2010).
35. J. S. Vink, A. de Koter, and H. J.G. L.M. Lamers, Astron. and Astrophys. **362**, 295 (2000).
36. G. Georgy, S. Ekström, G. Meynet, P. Massey, E. M. Levesque, R. Hirschi, P. Eggenberger, and A. Maeder, Astron. and Astrophys. **542**, 29 (2012).
37. J. Puls, J. S. Vink, and F. Najarro, Astron. and Astrophys. Rev. **16**, 209 (2008).
38. J. Krtička, Astron. and Astrophys. **564**, 70 (2014).
39. J.-P. Zahn, Mem. Soc. Roy. Sci. Liège **8**, 31 (1975).
40. D. Arnett, C. A. Meakin, and P. A. Young, Astrophys. J. **690**, 1715 (2009).
41. M. Viallet, C. Meakin, D. Arnett, and M. Mocak, Astrophys. J. **769**, 1 (2013).
42. C. A. Meakin and D. Arnett, Astrophys. and Space Sci. **328**, 221 (2010).
43. Е. И. Старицин, Астрон. журн. **90**, 420 (2013).
44. Ж.-Л. Тассуль, *Теория вращающихся звезд* (М.: Мир, 1982).
45. A. Maeder and J.-P. Zahn, Astron. and Astrophys. **334**, 1000 (1998).
46. S. Kato, Publ. Astron. Soc. Japan **18**, 374 (1966).
47. S. Sakashita and C. Hayashi, Progr. Theor. Phys. **26**, 942 (1961).
48. P. Ledoux, *Stellar Stability* (Berlin: Springer-Verlag, 1958).
49. Е. И. Старицин, Письма в Астрон. журн. **35**, 459 (2009).
50. B. Chaboyer and J.-P. Zahn, Astron. and Astrophys. **253**, 173 (1992).
51. Е. В. Бруяцкий, *Турбулентные стратифицированные струйные течения* (Киев: Наукова думка, 1986).
52. *Методы расчета турбулентных течений*, ред. В. Колльман, пер. с англ. В.И. Пономарева, Л.К. Эрдмана (М.: Мир, 1984).
53. S. Talon and J.-P. Zahn, Astron. and Astrophys. **317**, 749 (1997).
54. S. Talon, J.-P. Zahn, A. Maeder, and G. Meynet, Astron. and Astrophys. **322**, 209 (1997).
55. A. Maeder, Astron. and Astrophys. **399**, 263 (2003).
56. S. Mathis, A. Palacios, and J.-P. Zahn, Astron. and Astrophys. **425**, 243 (2004).
57. H. J. S. Fernando, Ann. Rev. Fluid Mech. **23**, 455 (1991).
58. C. de Jager, H. Nieuwenhuijzen, and K. A. van der Hucht, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **72**, 259 (1988).
59. B. Paczynski, Acta Astron. **20**, 47 (1970).
60. Е. И. Старицин, Астрон. журн. **76**, 678 (1999).
61. Е. И. Старицин, Астрон. журн. **82**, 710 (2005).
62. Е. И. Старицин, Письма в Астрон. журн. **33**, 111 (2007).
63. C. A. Iglesias and F. J. Rogers, Astrophys. J. **464**, 943 (1996).
64. D. R. Alexander and J. Ferguson, Astrophys. J. **437**, 879 (1994).
65. I. Yimer, I. Campbell, and L.-Y. Jiang, Canad. Aeronaut. and Space J. **48**, 195 (2002).
66. Е. И. Старицин, Астрон. журн. **78**, 541 (2001).
67. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, *Гидродинамика* (М.: Наука, 1986).
68. Е. И. Старицин, Астрон. журн. **73**, 850 (1996).