

УДК 532.526:537.523.5

Влияние высоты щели и разной плотности коаксиальных струй на смешение в ограниченном закрученном потоке*

Н.Е. Шишкин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: shishkin@itp.nsc.ru

Экспериментально исследуется влияние высоты коаксиальной щели на эффективность газовых завес в трубе. Неизотермичность потоков моделировалась смешением струй разной плотности: воздуха с аргонем или с гелием, измерялась концентрация инородного газа на стенке. Рассматривается воздействие закрутки пристенной струи, соотношения плотностей обоих потоков на ламинаризацию процессов смешения.

Ключевые слова: закрученная газовая завеса, концентрация газа на стенке, неизотермичность потоков, параметр стесненности.

Введение

Закрутка периферийного потока широко используется в плазмотронах с вихревой стабилизацией дуги для тепловой защиты ограничивающей стенки, в вихревых горелках, форсунках и камерах сгорания для устойчивого горения [1–4]. В многочисленных технологических устройствах вращение потока обеспечивает интенсивную перестройку к устойчивому движению вблизи начального сечения и ламинаризацию течения вниз по потоку. Использование закрученных потоков перспективно для охлаждения лопаток газовых турбин двигательных установок [5].

К числу факторов, определяющих интенсивность струйного смешения, относится параметр стесненности d_o/D (или s/D), где d_o и D — соответственно диаметры сопла основного потока и рабочего участка. Ранее влияние высоты кольцевой щели s на эффективность завесы не исследовалось, в настоящей работе представлены результаты экспериментов, в которых s/D равнялась 0,0434 ($s_1 = 2$ мм) и 0,206 ($s_2 = 9,5$ мм). Структура течения, эффективность защиты при $s_1 = 2$ мм изучались в работах [2, 3, 6, 7], поэтому остановимся подробнее на опытах при $s_2 = 9,5$ мм.

Ниже представлены результаты измерения температуры стенки и концентрации вдуваемого газа по длине канала как в случае незакрученного течения, так и при закрутке периферийного потока.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-19-00402).

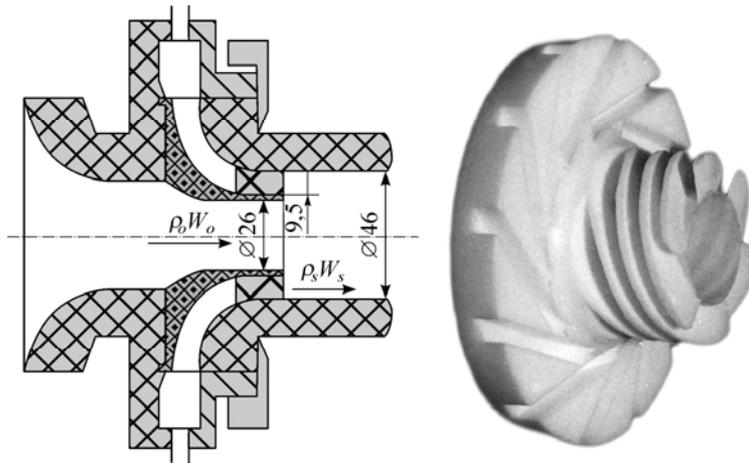


Рис. 1. Схема рабочего участка и вид закручивающей вставки.

Рабочий участок и система измерений

Опытные исследования были проведены в цилиндрическом канале диаметром $D = 46$ мм и длиной ~ 420 мм (рис. 1), на входе которого располагалась кольцевая щель высотой $s_1 = 2$ мм, либо высотой $s_2 = 9,5$ мм. Закрутка периферийного потока осуществлялась направляющими спиральными рёбрами, которые для этих высот кольцевых щелей имели угол выхода относительно осевого направления $\varphi_s = 0^\circ$ и 74° соответственно, фотография закручивающего элемента приведена также на рис. 1. Основной поток воздуха поступал в рабочий участок со средней скоростью $W_o = 0,7\text{--}90$ м/с. В тепловых опытах нагревался либо периферийный, либо осевой (основной) поток примерно на 60°C , что соответствовало отношению плотностей в пределах $\rho_s/\rho_o = 0,84\text{--}1,2$. В экспериментах с измерением концентрации инородного газа на стенке канала подавалась пристенная струя аргона или гелия. Гелий использовался также в качестве основного потока, что способствовало хорошему моделированию условия течения вблизи оси горячих газов метанового пламени при температуре $\sim 1400^\circ\text{C}$ [4].

Методика измерений концентрации инородных газов была разработана и использовалась в аналогичных экспериментах в работе [8]. Она заключалась в следующем. Через отверстия диаметром $0,3$ мм в канале рабочего участка смесь газов отсасывалась в силиконовые трубки объемом ~ 30 мл. Далее исследуемая смесь газов пропусклась через одно плечо измерительного моста, а воздух — через другое, возникающее при этом напряжение разбаланса электрического моста в хроматографе ГСТЛ фиксировалось по цифровому вольтметру. Ошибки измерения концентрации гелия этим методом составили $2,5\%$, аргона — $0,9\%$.

Тепловая газовая завеса

На рис. 2 сопоставлена эффективность тепловой завесы при двух значениях s/D . Представлены опыты при одинаковом параметре вдува $m = 0,3$ и близких значениях чисел Рейнольдса $\sim 1,1 \cdot 10^5$. Светлыми символами на рисунке обозначена эффективность незакрученной завесы. Как видно, с увеличением высоты тангенциальной щели распределение θ становилось выше. Отличие эффективности газовой завесы в рассматриваемых случаях во многом обусловлено расстоянием смыкания струйного пограничного слоя. Далее температура по сечению канала выравнивается, и θ приближается к $\theta_{см}$ (безразмерной температуре полного смешения).

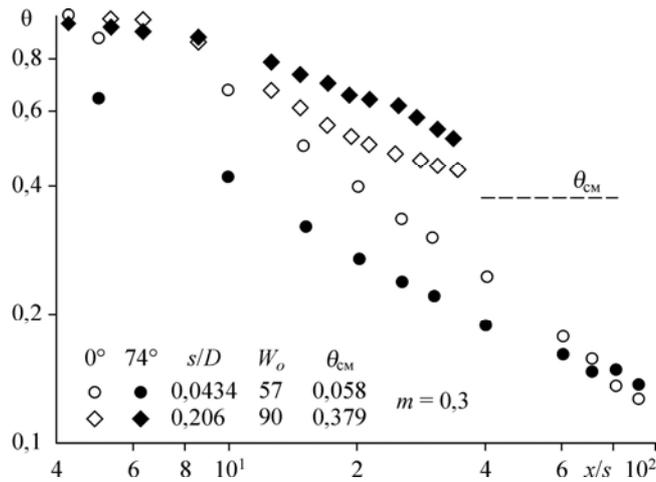


Рис. 2. Влияние высоты щели на эффективность тепловой завесы.

Наибольшее отличие по эффективности в зависимости от параметра стесненности наблюдалось при организации закрученной газовой завесы (темные символы на рис. 2). При небольшой высоте щели ($s_1 = 2$ мм) значения опытных данных располагаются ниже, чем при незакрученном течении на расстоянии до $x/s < 80$. Далее вниз по потоку безразмерная температура стенки при закрутке завесы становится выше. В случае истечения через щель высотой $s_2 = 9,5$ мм снижение эффективности закрученной завесы вблизи щели практически незаметно. На большей части исследуемого канала ($x/s > 80$) наблюдалось преимущество закрученной завесы относительно незакрученной. Так как поперечный размер пристенной струи и начальный момент количества движения во втором случае был больше и закрутка быстрее распространялась на центральный поток, происходила более ранняя стабилизация течения по всему каналу, что и привело к повышению эффективности завесы при ее закрутке.

Экспериментальные данные по эффективности завесы, организованной из кольцевой щели высотой $s_2 = 9,5$ мм, рассматривались в зависимости от обобщенной координаты $K_m = Re_{\Delta x} / [Re_s (\mu_s / \mu_o) (1 - s/D)]^{1,25}$. Для случая незакрученной завесы и при отсутствии возмущающих факторов ($\Psi = 1$) имеем следующую формулу [9], соответствующую турбулентному режиму течения, которая удовлетворительно описывает опыты в осесимметричном канале

$$\theta = [1 + 0,25 Re_{\Delta x} Re_s^{-1,25} (\mu_o / \mu_s)^{1,25} (1 - s/D)^{-1,25}]^{-0,8}, \quad (1)$$

где $Re_{\Delta x}$ — число Рейнольдса, определяемое по параметрам основного потока и расстоянию $\Delta x = x - x_0$, x_0 — длина начального участка.

Результаты такой обработки нанесены на рис. 3, где светлые символы соответствуют опытам при незакрученном течении, темные — при закрутке периферийного потока. Как видно из рисунка, в обоих случаях наблюдается обобщение опытных данных между собой при параметрах вдува $m = 0,2-0,5$. В закрученном потоке смешение струй замедляется — темные символы (для закрученного потока) расположены выше светлых (для незакрученного движения). С уменьшением начальной разности скорости между потоками ($m = 0,9$, $\varphi_s = 0^\circ$) перемешивание также замедляется.

Полученные экспериментальные данные об эффективности тепловой завесы были сопоставлены с расчетом по формуле (1), который на рис. 3 нанесен сплошной линией. Как видно, расчетная кривая располагается ниже опытных точек, т.е. в этих условиях выравнивание температуры внутри пограничного слоя сомкнувшихся коаксиальных струй замедляется. При вихревом движении процессы смешения еще более ослабляются — безразмерная температура стенки становится выше.

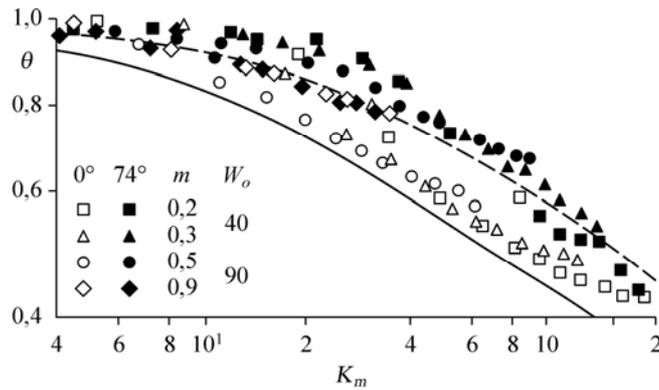


Рис. 3. Обобщение опытных данных об эффективности закрученной тепловой завесы за кольцевым соплом высотой $s_2/D = 0,206$.

В работе [10] результаты измерения коэффициента трения за проникаемым участком обобщались зависимостью, аналогичной расчету эффективности газовой завесы. Эта зависимость дает более медленное снижение параметра трения вниз по потоку, чем для параметра тепловой эффективности. Так как в работе [10] трение определялось по измеренным градиентам осредненной скорости в вязком подслое и результаты обобщения не описывались формулами для эффективности завесы, то можно сделать следующий вывод. Изменение параметров течения во внутренней (пристенной) области пограничного слоя более консервативно, здесь меньше градиент рассматриваемых величин. При смыкании пограничного слоя в трубе эволюция параметров газового движения по длине канала будет определяться закономерностями пристенного течения.

Проведя аналогию с изменением параметра трения и эффективности завесы вблизи стенки для сомкнувшихся коаксиальных потоков, можно согласно [10] записать соотношение для эффективности завесы в виде

$$\theta = [1 + 0,1 \text{Re}_{\Delta x} \text{Re}_s^{-1,25} (\mu_o / \mu_s)^{1,25} (1 - s/D)^{-1,25}]^{-0,8}. \quad (2)$$

На рис. 3 результаты расчета по формуле (2) нанесены штриховой линией, которая наилучшим образом описывает эксперименты при закрутке периферийного потока, а также совпадающие с ними опыты с $m = 0,9$, $\varphi_s = 0^\circ$.

Распределение инородного газа на поверхности при его вдуве через щель

Кроме опытов с тепловой завесой измерялась концентрация аргона и гелия на стенке при поступлении инородного газа через коаксиальное сопло высотой $s_2 = 9,5$ мм. На рис. 4 показано влияние закрутки вторичного потока на распределение весовой концентрации аргона и гелия, используемых в качестве завесы. Так как отношение плотностей обоих потоков при вдуве аргона $\rho_s/\rho_o = 1,36$ близко к значениям $\rho_s/\rho_o = 0,84-1,2$ в опытах с тепловой завесой, то и изменения концентрации аргона на стенке трубы носили такой же характер, как и у параметра тепловой завесы (рис. 3). Вдув легкого газа — гелия — продемонстрировал те же особенности в распределении его концентрации вдоль поверхности стенки, что и в экспериментах при $s_1 = 2$ мм.

Для изучения процессов смешения в тяжелом закрученном потоке осуществлялась подача воздушной пристенной струи в гелиевый основной поток. Результаты измерения концентрации гелия в этом случае представлены на рис. 5 как изменение весовой

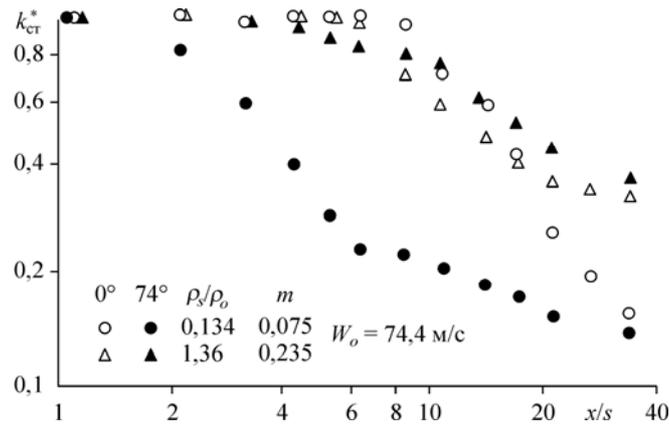


Рис. 4. Весовая концентрация аргона и гелия на стенке, $s_2/D = 0,206$.

концентрации воздуха по длине канала. Здесь же для сопоставления нанесены результаты экспериментов со вдувом аргона при близких начальных параметрах: $m = 0,54$, $W_s = 14,9$ м/с, $Re_o = 4,5 \cdot 10^4$ — в опытах с гелием и соответственно $0,59$, $14,6$ м/с, $5,8 \cdot 10^4$ — с аргоном.

Как следует из рисунка, распределение концентрации воздуха на стенке при вдуве его в гелиевый основной поток отличается от распределения, полученного в экспериментах с кольцевой щелью высотой $s_1 = 2$ мм [2, 6]. При незакрученном течении концентрации как воздуха, так и аргона практически совпадают в начале и в конце рабочего участка, исключая участок $7 < x/s < 20$, где опытные точки разошлись не более чем на 12%. Сильное влияние на перемешивание газов оказывает закрутка воздушного потока. Если при $s_1 = 2$ мм этого влияния не было обнаружено, то при $s_2 = 9,5$ при вихревом движении воздушная струя размывалась медленнее, чем в отсутствии закрутки.

Так как вдув воздуха в гелий через щель высотой 2 мм выявил ламинарный характер перемешивания соосных струй, то для экспериментов с подачей воздуха через кольцевое сопло высотой $s_2 = 9,5$ мм была сделана оценка изменения $k_{ст}^*$ в координатах для ламинарного режима течения и сопоставлена с зависимостью, предложенной в работе [9]:

$$\theta = [1 + 10,6 \cdot Re_{\Delta x} \cdot Re_s^{-2} (\mu_o / \mu_s)^2 (1 - s/D)^2]^{-0,5}. \quad (3)$$

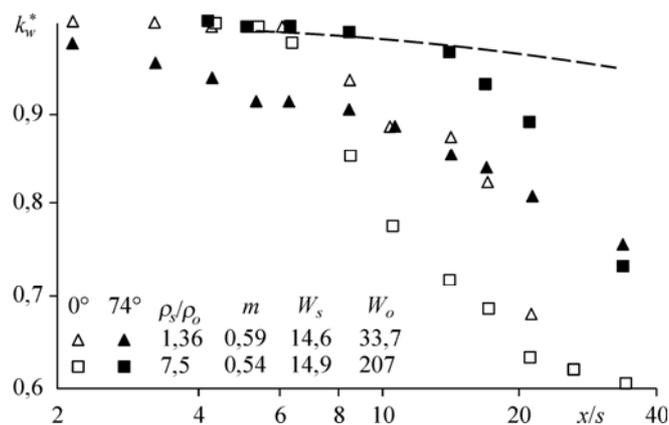


Рис. 5. Сравнение концентрации аргона и воздуха на стенке при их вдуве соответственно в воздух и в гелий.

Пунктирная линия — расчет распределения воздуха для ламинарного течения.

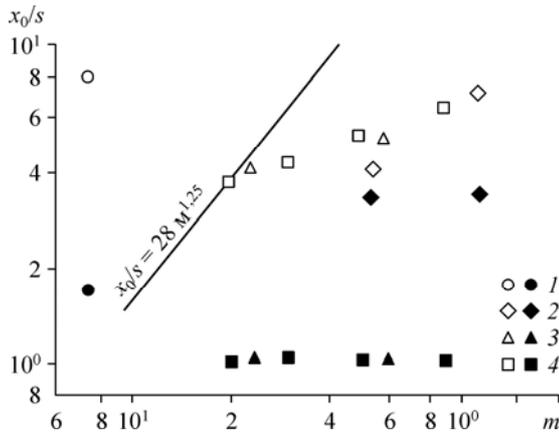


Рис. 6. Длина начального участка в опытах с коаксиальной щелью относительной высотой $s/D = 0,206$.

Вдувы: гелий в воздух (1), воздух в гелий (2), аргон в воздух (3), воздух в воздух (тепловая завеса) (4).

Расчет по формуле (3) нанесен на рис. 5 штриховой линией и явно не соответствует характеру изменения концентраций как воздуха, так и аргона по длине канала.

Характер снижения $k_{ст}^*$ (ламинарный либо турбулентный) зависел от того, какие начальные условия

предшествовали струйному смешению: радиальный градиент плотности, степень ограниченности коаксиальных потоков (соотношение s/D), режим течения. Вследствие малочисленности опытов не представляется возможным ограничить по числам Рейнольдса области, в которых происходит ламинаризация течения или организуется турбулентное смешение потоков. Однако можно сделать вывод, что характер перемешивания потоков определяется в значительной степени соотношением основного и периферийного потоков по плотности.

Важной характеристикой взаимодействия потоков является длина начального участка. В этом случае, как и в работах [8, 11], она определялась путем экстраполяции прямой по опытным точкам до пересечения с ординатой $\theta = 1$. Так как этот метод при $s_2 = 9,5$ мм не всегда позволял провести по точкам прямую однозначно, то x_0 находилась по началу изменения θ или $k_{ст}^*$. Определенная таким способом величина x_0 приведена на рис. 6 в зависимости от m , она же использовалась и при определении обобщенных координат рис. 3 и 7.

Как видно, характер изменения от изучаемых параметров сохранился несмотря на увеличение высоты кольцевой щели. Длина начального участка закрученной завесы относительно незакрученной сокращалась и оставалась постоянной независимо от m . При $s_2 = 9,5$ мм получена вдвое меньшая величина x_0 вследствие иного способа ее нахождения, чем в случае вдува через щель высотой 2 мм. Для сопоставления экспериментов

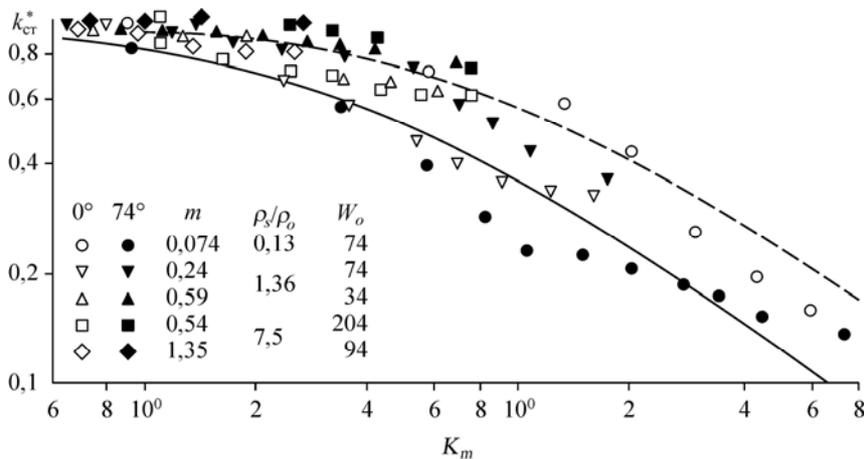


Рис. 7. Весовая концентрация периферийного газа на стенке в обобщенных координатах.

Линии: сплошная — расчет по уравнению (1), штриховая — по уравнению (2).

с незакрученными потоками проведена прямая $x_0/s = 28 m^{1.25}$ [8], которой хорошо обобщались опыты с кольцевой щелью $s_1 = 2$ мм. Совпадение с расчетной прямой наблюдается при $m \sim 0,2$, далее с увеличением m опытные точки располагаются существенно ниже. Можно также отметить, что смешение квазиизотермических струй или вдув более тяжелого газа практически не изменяет x_0 .

С учетом длины начального участка результаты измерения концентрации инородного газа вблизи стенки канала были представлены в обобщенных координатах (рис. 7). Из графика видно, что опытные точки располагаются в основном между двумя кривыми, рассчитанными по формулам (1) и (2), аналогично эффективности тепловой газовой завесы (рис. 3). При отсутствии закрутки периферийного газа, а также в случае закрутки легкого газа — гелия — эффективность завесы может приближенно быть выражена формулой (1). В остальных случаях закрутка уменьшала интенсивность перемешивания: результаты измерений концентрации инородного газа на поверхности были ближе к расчетной зависимости (2).

Выводы

Положительный градиент плотности по радиусу трубы и снижение числа Рейнольдса основного потока способствуют ламинаризации течения. При закрутке периферийной струи полной ламинаризации течения не достигается. Однако при турбулентном режиме течения закрутка пристенной струи повышает устойчивость течения, что является весьма важным фактором в ряде случаев, например, в плазмотронах с вихревой стабилизацией дуги. Таким образом, ламинаризация струйного смешения, несмотря на большой градиент плотности ($\rho_s/\rho_o = 7,5$), зависит от чисел Рейнольдса не только основного, но и периферийного потоков и, возможно, определяется также параметром стесненности s/D .

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. 290 с.
2. Низкотемпературная плазма. Т. 15. Тепловая защита стенок плазмотронов / А.И. Леонтьев, Э.П. Волчков, В.П. Лебедев и др. Новосибирск: ИТФ СО РАН. 1995. 336 с.
3. Volchkov E.P., Lebedev V.P., Terekhov V.I., Shishkin N.E. An experimental study of the flow stabilization in a channel with a swirled periphery jet // Int. J. Heat and Mass Trans. 2000. Vol. 49. P. 375–386.
4. Beer J.M., Chigier N.A., Davies I.W., Bassindale K. Laminarization of turbulent flames in rotating environments // Combustion and Flame. 1971. Vol. 16, No. 1. P. 39–45.
5. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Тепломассообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин / А.А. Халатов, В.В. Романов, И.И. Борисов, Ю.Я. Дашевский, С.Д. Северин. Киев: ИТТФ НАНУ, 2010. Т. 9. 317 с.
6. Shishkin N.E. Laws of jet mixing of the swirled flows in a pipe // J. Energy and Power Engng. 2013. Vol. 7. P. 1223–1230.
7. Терехов В.И., Шихкин Н.Е. Способы повышения эффективности пленочного охлаждения с помощью вихревых пристенных струй // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 695–704.
8. Волчков Э.П., Синайко Е.И. Измерение концентрации газа на стенке при локальном вдуве в начальном участке трубы аргона и гелия // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1970. № 6. С. 131–135.
9. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия. 1972. 343 с.
10. Барышев Ю.В., Леонтьев А.И., Пейкер Н.К. Закон трения в области газовой завесы за проникаемым участком // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1979. № 2. С. 159–162.
11. Seban R.A. Heat transfer and effectiveness for a turbulent boundary layer with tangential fluid injection // Transaction of the ASME, Ser. C: J. Heat Transf. 1960. Vol. 82. No. 4. P. 303–312.

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2014 г.