

Численное и экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при безградиентном обтекании пластины

Кон Дехай, магистр

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

Научный руководитель: Афанасьев В. Н., д.т.н., профессор

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

khves@power.bmstu.ru

Введение

Постоянное совершенствование и развитие энергосистем значительно повышает требования к эффективности и надежности их работы. Существенного улучшения характеристик теплообменных энергосистем, включая массогабаритные параметры, уменьшение металлоёмкости, температуры поверхностей, рост надёжности и ресурса работы, можно достигнуть, используя оптимальные методы интенсификации теплообмена.

Поскольку в большинстве теплообменных аппаратов используется жидкий или газообразный теплоноситель, который при течении соприкасается с твердой поверхностью, то исследование влияния последней на конвективный теплообмен представляет большой практический интерес. Данная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию турбулентного пограничного слоя, который наиболее часто имеет место в инженерной практике и в природе. В турбулентном потоке отдельные объемы жидкости начинают двигаться поперек потока, вызывая интенсивное перемешивание жидкости и, как следствие, это приводит к существенной интенсификации обменных процессов. Поэтому весьма ответственным моментом при проектировании теплообменных систем является выбор типа поверхности теплообмена. Очевидно, что наилучшей поверхностью будет та, которая при прочих одинаковых условиях обеспечивает максимальный

коэффициент теплоотдачи. Известно [1...4], что основные методы интенсификации теплообмена направлены на разрушение или искусственную турбулизацию пограничного слоя.

Конструктору, разрабатывающему или создающему различные энергосистемы важно знать: Как и в каких условиях будет функционировать разрабатываемое им оборудование? На эти вопросы может дать ответ расчет. Создание расчетных методов – это одна из главных задач специалистов, работающих в области прикладных наук. В настоящее время предлагается много расчетных программ, предназначенных для решения различных задач. Данная работа направлена на выбор метода расчета, который должен рассчитать представляющие практический интерес характеристики и свойства потока, такие как, поля скоростей и температур, толщину пограничного слоя, тепловые потоки и т.п., в существующих или разрабатываемых конструкциях.

Существенное значение для многих областей техники и прежде всего для энергетики имеет теория тепломассообмена, изучающая процессы переноса энергии и массы. Математический аппарат теории тепломассообмена основан на использовании балансовых уравнений импульса, теплоты и массы, к которым добавляются соотношения между их потоками и градиентами скоростей, температур и концентраций (гипотезы Ньютона, Фурье и Фика). Для замыкания системы уравнений необходимо иметь дополнительную информацию о коэффициентах переноса (теплопроводности, вязкости и диффузии). В связи с интенсивным развитием численных методов решения исходной системы уравнений пограничного слоя достоверность данных о коэффициентах переноса определяет точность расчета процессов гидродинамики и теплообмена. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования теплофизических свойств веществ и процессов в них остаётся одним из основных направлений фундаментальных исследований в области теплофизики. Сочетание численных методов расчета с физическим и техническим экспериментами с использованием последних достижений в области диагностики и компьютеризации является наиболее эффективным направлением в современной теории тепломассообмена. Только в настоящее время при использовании самых мощных из существующих суперкомпьютеров применение прямого численного моделирования Direct Numerical Simulation (DNS), т.е. непосредственного (без какого-либо

предварительного осреднения) численного решения уравнений Навье-Стокса, возможно для относительно простых течений при низких числах Рейнольдса (порядка 10^3 и меньше) DNS применяется пока лишь в фундаментальных исследованиях, целью которых является получение детальной информации о структуре и основных закономерностях турбулентности [5]. Это несколько не умаляет важности данного подхода, поскольку полученные при этом результаты, наряду с экспериментальными данными, составляют основу для калибровки и тестирования полуэмпирических моделей турбулентности.

Для получения количественных закономерностей в исследуемых процессах применяют два метода исследования.

Первый метод основан на экспериментальном изучении конкретного процесса. Экспериментальное изучение множества сложных процессов, зависящих от большого числа отдельных факторов, является чрезвычайно трудным делом. Поэтому, при постановке эксперимента помимо подробного изучения рассматриваемого процесса всегда ставится задача получить данные для расчета других процессов, подобных исследуемому.

Второй метод основан на решении системы уравнений, описывающих изучаемое явление. Аналитическое решение полной системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена связано с исключительно большими математическими трудностями.

Известно, что при взаимодействии теплопередающей поверхности с омывающим ее потоком основное гидродинамическое сопротивление и сопротивление теплоотдаче оказывает пограничный слой, нарастающий на данной поверхности. Несмотря на свою незначительную толщину по сравнению с характерными внешними размерами обтекаемого тела, пограничный слой играет основную роль в процессах динамического и теплового взаимодействия потока жидкости с поверхностью.

Экспериментальное исследование

Объектом данного экспериментального исследования является структура теплового и динамического пограничных слоев, развивающихся на плоской пластине.

Экспериментальная часть выполнялась на малой дозвуковой низкотурбулентной аэродинамической трубе открытого типа, работающей по принципу всасывания.

Подробное описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента приведены в [3, 4]. Рабочий участок (нижняя стенка), на котором исследовался, возникающий при безградиентном обтекании турбулентный пограничный слой, нагревался по закону $q_{ст} = \text{const}$.

О среднем течении в пограничном слое можно судить по распределению скоростей, а о теплопереносе - по профилям температуры. Совместное измерение распределения скоростей и температур в потоке дает возможность количественно проанализировать и сопоставить теплообмен в различных областях пограничного слоя, включая вязкий подслой при турбулентном течении.

Распределение скоростей и температур, исследовалось в сечениях 1, 2 и 3 при числах Рейнольдса, близких к состоянию полностью развитого турбулентного течения в пограничном слое. Из рассмотрения экспериментально полученных профилей скорости и температуры рис. 1 видно, что в первых сечениях профили скорости и температуры менее заполнены, но по мере увеличения числа Re (увеличения номера сечения) они становятся более заполненными и приближаются к закону одной седьмой, т.е. исследуемый пограничный слой становится вполне развитым и турбулентным. На это указывает и величина формпараметра $H = \delta^*/\delta^{**}$, изменявшегося от 1,47 до 1,44 что соответствует данным [3, 4, 6].

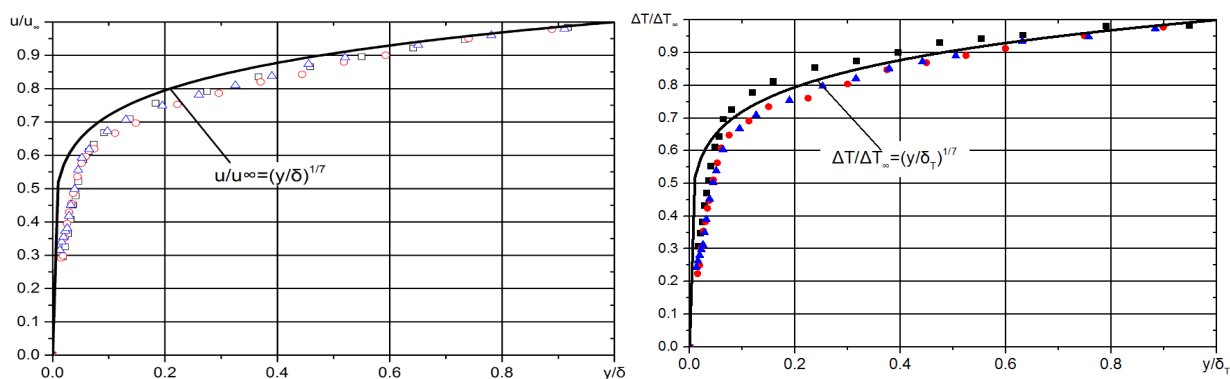


Рис. 1. Распределение скорости и температуры в пограничном слое:

скорость - сечение $\triangle$ - 1; $\circ$ - 2; $\square$ - 3; температура - сечение $\blacktriangle$ - 1; $\bullet$ - 2; $\blacksquare$ - 3

В таблицах 1 и 2 приведены результаты экспериментальных исследований динамического и теплового пограничных слоев на пластине. Локальные значения

коэффициента трения в турбулентном пограничном слое находили путем использования косвенного метода определения напряжения на стенке по логарифмической части профиля скорости (метод Клаузера).

Таблица 1

Результаты экспериментальных и численных исследований динамического пограничного слоя

№ Сеч.	$u_{\infty \dot{Y}}$, м/с	$u_{\infty \text{Д}}$, м/с	$\delta_{\dot{Y}}$, мм	$\delta_{\text{Д}}$, мм	$\delta_{\dot{Y}}^*$, мм	$\delta_{\text{Д}}^*$, мм	$\delta_{\dot{Y}}^{**}$, мм	$\delta_{\text{Д}}^{**}$, мм	$Re_{\dot{Y}}^{**}$	$Re_{\text{Д}}^{**}$	$f_{\dot{Y}}$	$C_{f_{\dot{Y}}}$ $\cdot 10^3$	$C_{f_{\text{Д}}}$ $\cdot 10^3$
1	9.29	9.84	10.9	10.3	1.76	1.28	1.20	0.89	740	578	1.47	4.7	5.2
2	9.60	9.87	13.5	14.5	2.28	2.03	1.56	1.45	997	949	1.46	4.4	4.8
3	9.94	9.90	15.4	16.9	2.44	2.51	1.69	1.80	1117	1181	1.44	4.3	4.4

Таблица 2

Результаты экспериментальных и численных исследований теплового пограничного слоя

№ Сеч.	X , мм	$\Delta T_{\infty \dot{Y}}$, °C	$\Delta T_{\infty \text{Д}}$, °C	$\delta_{\dot{O} \dot{Y}}$, мм	$\delta_{\dot{O} \text{Д}}$, мм	$\delta_{T \dot{Y}}^{**}$, мм	$\delta_{T \text{Д}}^{**}$, мм	$Re_{T \dot{Y}}^{**}$	$Re_{T \text{Д}}^{**}$	q_{CT} , Вт/м ²	$St_{\dot{Y}}$ $\cdot 10^3$	$St_{\text{Д}}$ $\cdot 10^3$
1	270	11.8	11.6	12.7	11.4	0.96	1.09	594	704	348	2.7	2.5
2	570	11.5	11.6	13.4	14.3	1.44	1.68	916	1103	348	2.6	2.5
3	920	11.6	11.6	16.1	17.1	1.74	1.92	1142	1262	348	2.5	2.5

На рис. 2 значения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи (числа Стантона) показаны в зависимости от числа Рейнольдса, построенного по толщине потери импульса и энергии соответственно и сравниваются с известными законами трения

$$C_f = 0.0252(Re^{**})^{-0.25}$$

и теплообмена

$$St = 0.0144(Re_T^{**})^{-0.25}$$

Отклонения найденных значений коэффициентов трения и теплоотдачи от известных законов не превышают 8 %, что соответствует пределам точности эксперимента.

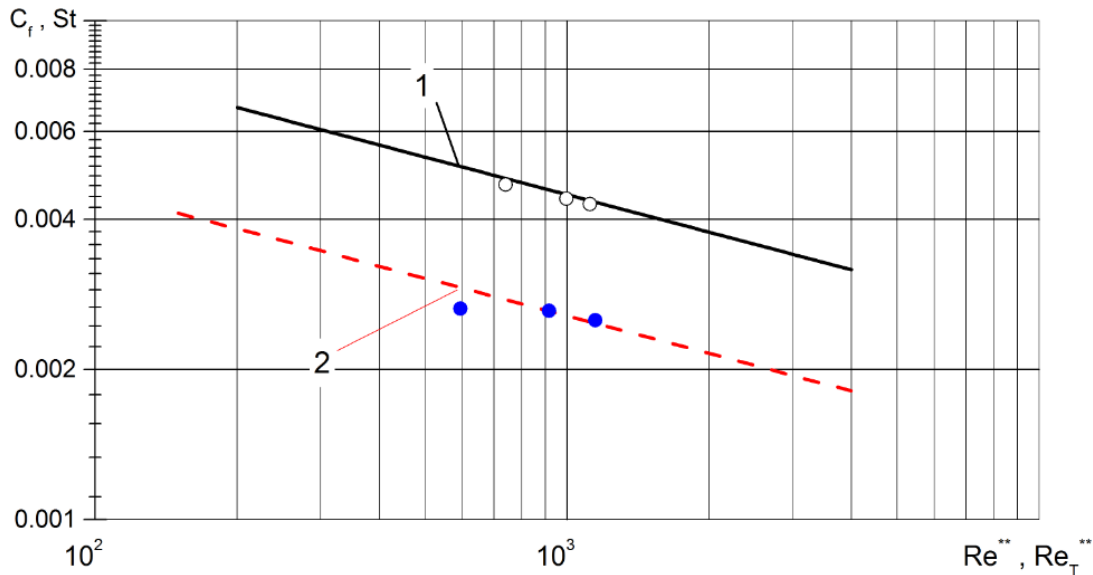


Рис. 2. Трение и теплообмен на плоской пластине: 1 - закон трения; 2 - закон теплообмена

Численные исследования

Численное исследование состоит в определении параметров, характеризующих гидродинамику и теплообмен путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса количества движения и теплоты, с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Данная методика позволяет определить профили средних скоростей и температур, интегральные величины: толщины вытеснения, потери импульса и потери энергии, динамическую скорость, местные коэффициенты трения и теплоотдачи, толщины пограничных слоев динамического и теплового, формпараметр и др.

Рассматривались базовые варианты моделей турбулентности: к-ε, к-ω(standard), к-ω(SST), тестирование которых проводилось на примере безградиентного обтекания плоской пластины. Геометрия расчетной области соответствовала рабочему участку (рис. 3).

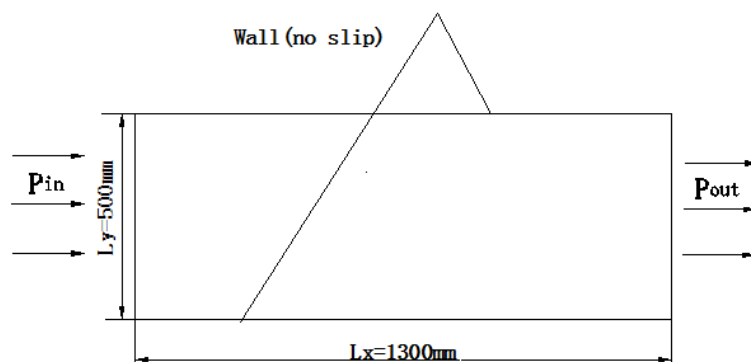


Рис. 3. Геометрия расчетной области

Для расчетной области строилась гексагональная сеточная модель. На первом этапе расчета проверялась сеточная сходимость решения с использованием к-ε модели турбулентности с модифицированной пристеночной функцией, работающей при $y^+ \leq 1$ и $30 \leq y^+ \leq 300$. В таблице 3 приведены исследуемые варианты сеточных моделей. Результаты расчета сравнивались с экспериментально полученными в сечении 3 безразмерными профилями скорости и температуры (рис. 4). На рис. 4 наблюдается сходимость решения по мере уменьшения размеров ячеек. Для дальнейших расчетов был выбран вариант с размерностью сетки 60×160 из-за более качественного описания профиля скорости в пристеночной области.

Таблица 3

Значение y^+ для рассматриваемых сеточных моделей

Параметры $N_x \times N_y$	y^+	y_1
15×40	60-90	5
30×80	30-45	2.5
60×160	0.5-1.2	0.04
120×320	0.25-0.6	0.02

где N_x, N_y - соответственно количество элементов по длине и ширине плоской пластины;
 y_1 - толщина первой расчетной ячейки; y^+ – безразмерный пристеночный шаг сетки

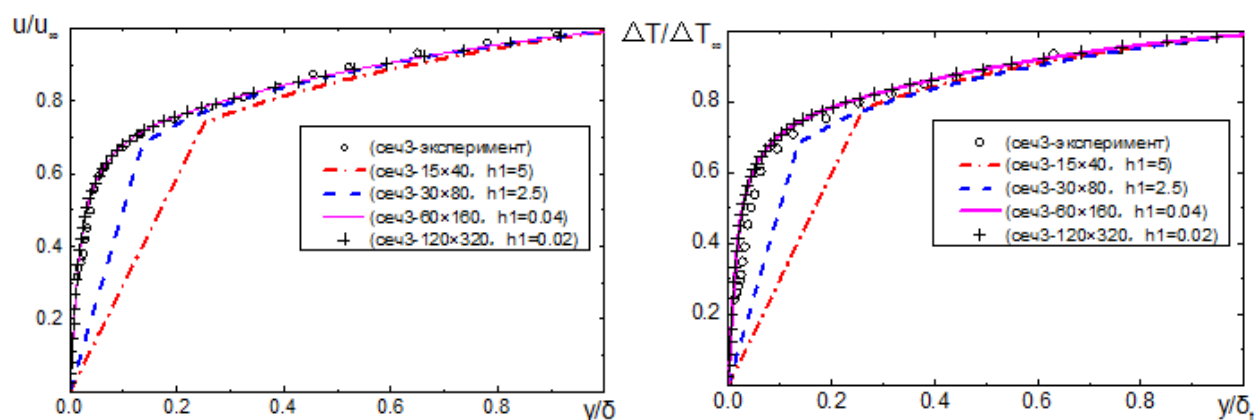


Рис. 4. Безразмерные профили скорости и температуры для разных вариантов сеточной модели

Выбор модели турбулентности

На следующем этапе исследовалось влияние различных моделей турбулентности на результаты расчета. Рассматривались следующие модели турбулентности: к-ε, к-ω(standard), к-ω(SST). На рис. 5 представлены результаты расчета с использованием указанных моделей турбулентности и экспериментально полученные безразмерные профили скорости и температуры (сечение 3). Сравнение полученных результатов показывает, что расчеты с использованием к-ε модели турбулентности дают наилучшее совпадение результатов.

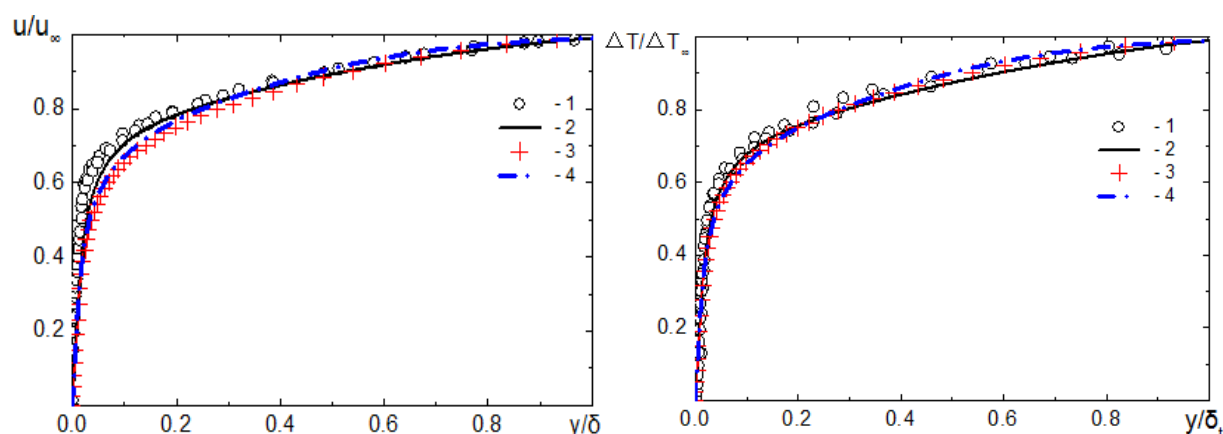


Рис. 5. Безразмерные профили скорости и температуры для различных моделей турбулентности: 1-эксперимент; 2- к-ε; 3- к-ω(standard); 4- к-ω(SST)

Влияние степени турбулентности

На рис. 6 представлен сравнительный анализ экспериментально полученных профилей скорости и температуры с результатами расчетов с использованием к-ε модели турбулентности при различных значениях степени турбулентности. Нетрудно видеть, что при низкой степени турбулентности ($\epsilon \leq 3,8 \%$), результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными, но с увеличением степени турбулентности (ϵ порядка 10 %), результаты расчета значительно расходятся с экспериментальными данными.

В работе аналитически с использованием модели турбулентности к-ε и степени турбулентности 1 % определены профили средних скоростей и температур, интегральные величины: толщины вытеснения, потери импульса и потери энергии, а также динамическая скорость, местные коэффициенты сопротивления трения и теплоотдачи, толщины динамического и теплового пограничных слоев и результаты сравниваются с соответствующими экспериментально полученными данными. Из рассмотрения таблиц 1 и 2 и графического представления результатов нетрудно видеть неплохое соответствие полученных результатов.

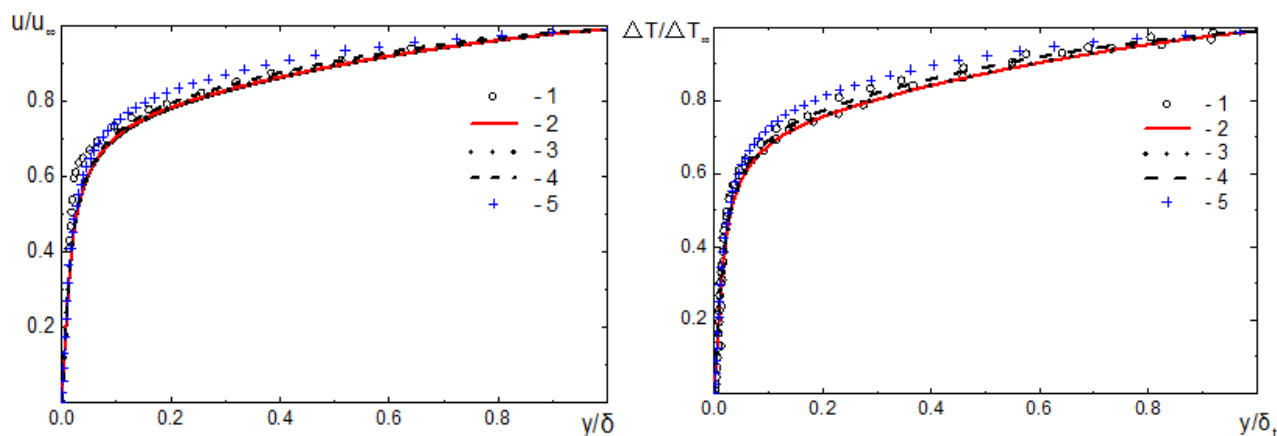


Рис. 6. Профили безразмерных скоростей и температур для различных степеней турбулентности. 1 - эксперимент; 2 - 0.2%; 3 - 1%; 4 - 3.8%; 5 - 10%

Выводы

Данное исследование показало, что использование программного пакета ANSYS FLUENT для расчета характеристик гидродинамики и теплообмена в турбулентном пограничном слое при безградиентном обтекании пластины могут успешно применяться

модели турбулентности $k-\epsilon$ и $k-\omega$ (SST), показавшие хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом.

Список литературы

1. Берглас А. Интенсификация теплообмена // Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы. М.: Мир, 1981. С. 145-192.
2. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И.. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / под ред. Ю.А. Кузма-Кичта М.: ФГТУ «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. 532 с.
3. Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. М.: МГТУ, 1990. 118 с. (Препринт МГТУ им. Баумана N 1-90).
4. Афанасьев В.Н., Трифонов В. Л. Интенсификация теплоотдачи при вынужденной конвекции. Методические указания. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 68 с.
5. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 447 с.
6. Шишов Е.В., Югов В.П., Афанасьев В.Н. Экспериментальное исследование турбулентного пограничного слоя на плоской пластине с нулевым градиентом давления и постоянным тепловым потоком / // Тр. МВТУ. 1976. № 222. С. 121-129.