

УДК 532.526 535.8

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕНЕВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

О.Д. НИКИШОВА, В.В. ОЛЕКСЮК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 10.02.2003

Цель данной работы – исследование деформаций поля неоднородности жидкости в ламинарном пограничном слое посредством визуализации неоднородностей теневым прибором. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований трансформации поля температуры в ламинарном пограничном слое плоской пластины при обтекании ее потоком неоднородной жидкости. Обнаружено, что имеет место усиление градиента неоднородности в пограничном слое. Предлагается использовать этот эффект для увеличения чувствительности теневых приборов путем искусственного создания сдвигового течения в просмотровом объеме. Показано, что в пограничном слое, образуемом на сферических поверхностях при их обтекании, могут возникать неоднородности в виде вихрей Тейлора-Гертлера, что необходимо учитывать при интерпретации показаний таких приборов, как, например дистанционный телевизионный визуализатор неоднородностей типа ДТВН, со сферической незащищенной оптикой в просмотровом объеме.

Мета цієї роботи – дослідження деформацій поля неоднорідності рідини в ламинарному пограничному шарі за допомогою візуалізації неоднорідностей тінювим приладом. Приведено результати теоретичних і експериментальних досліджень трансформації поля температури в ламинарному пограничному шарі плоскої пластини при обтіканні її потоком неоднорідної рідини. Виявлено, що має місце посилення градієнту неоднорідності в пограничному шарі. Пропонується використовувати цей ефект для збільшення чутливості тінювих приладів шляхом штучного створення зсувної течії в переглядовому об'ємі. Показано, що в пограничному шарі, що утворюється на сферичних поверхнях при їхньому обтіканні, можуть виникати неоднорідності у вигляді вихорів Тейлора-Гертлера, що необхідно враховувати при інтерпретації показань таких приладів, як, наприклад, дистанційний телевізійний візуалізатор неоднорідностей типу ДТВН, із сферичною незахищеною оптикою в переглядовому об'ємі.

The purpose of the given work is the research of deformations of a field of heterogeneity of a liquid in laminar a boundary layer by means of visualization of heterogeneities by the shadow device. The outcomes of idealized and experimental researches of transformation of a field of temperature in a laminar boundary layer of a flat plate are adduced at streamlining by its flow of an inhomogeneous liquid. Is rotined, that there is a amplification of a gradient of a of heterogeneities in a boundary layer. It's proposed use this effect for increasing of the sensitivity of shadow devices by way making the artificial shifting of the stream in a revise volume. Is rotined, that in a boundary layer which is generatrix on spherical surface at their streamlining, there can be whirling as vortexes Taylor-Görtler, that it is necessary to allow at interpretation of the indications of such devices, as, for example, remote television visualisotor of heterogeneities such as ДТВН, with the spherical unsheltered optics in a revise volume.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при исследовании течений жидкости и газа все большую актуальность приобретают оптические методы, в частности, теневые. В тех случаях, когда изучаемая жидкость, обтекающая элементы оптической системы (линзы, зеркала, экраны, ограничивающие поверхности), является неоднородной, в показаниях приборов могут появляться систематические ошибки. Это связано с тем, что сдвиговые течения в гидродинамическом пограничном слое на обтекаемых поверхностях приводят к изменению поля неоднородности жидкости. Процесс аналогичен известному в метеорологии фронтогенезу, вызываемому деформационным полем скорости [1].

Обычно встречается ситуация, при которой два смежных объема воды, значительно различающихся по температуре, сдвигаются под действием вертикального градиента скорости, в результате

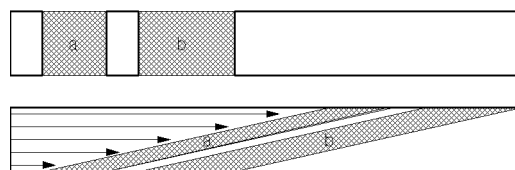


Рис. 1. Резкие вертикальные градиенты температуры могут образоваться, когда сдвиговое течение скашивает под косым углом два смежных объема воды с разными температурами (А,В)

чего возникает большой контраст температуры по вертикали (рис.1). Вероятно, этот механизм обуславливает многие особенности крупномасштабных вертикальных температурных профилей и некоторых из профилей менее значительных размеров "ступенчатого вида", наблюдаемых вблизи поверхности океана [2].

В экспериментальной работе [3] показано, что градиент поля температуры разворачивается и существенно изменяет свою величину в зависимости от текущего числа Рейнольдса в пределах пограничного слоя, причем по толщине пограничного слоя могут образовываться несколько высокоградиентных прослоек.

Указанные особенности трансформации возмущений температуры в пограничном слое необходимо учитывать при рассмотрении неустойчивости течения неоднородной жидкости около твердых поверхностей, при изучении распространения света в пограничном слое неоднородной жидкости и при исследовании процессов тепломассопереноса.

Цель данной работы – исследование деформаций поля неоднородности жидкости в пограничном слое и использование этого явления для повышения чувствительности теневых приборов и для регистрации слабых горизонтальных градиентов неоднородности в движущейся жидкости. Слабые горизонтальные градиенты неоднородности в движущейся жидкости рассматриваются как пассивные примеси, которые не влияют на динамику жидкости.

1. ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЯ ПЛОТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Изучению стратифицированных пристенных течений посвящено большое количество работ, причем рассматриваются чаще всего вопросы активного влияния стратификации на течение при постоянном значении температуры обтекаемой поверхности [4 – 6]. В работах [7, 8] при пренебрежении процессами молекулярной диффузии рассмотрена задача о деформации поля плотности в ламинарном пограничном слое, когда неоднородность среды обусловлена пассивной примесью и поток примеси через обтекаемую поверхность отсутствует. В частности, найдено, что если величина градиента примеси в набегающем потоке постоянна, т.е.

$$\text{grad } \rho = \vec{i} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \rho}{\partial y} = \rho_0 (\vec{i} k_1 + \vec{j} k_2) = \text{const},$$

то соответствующие величины внутри пограничного слоя будут:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} = k_1 F_1(\eta) + \frac{k_2 F_2(\eta)}{\sqrt{\text{Re}}};$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} = k_1 \sqrt{\text{Re}} F_3(\eta) + k_2 \sin \frac{\pi}{10} \eta.$$

Функции $F_i (i = 1, 2, 3)$, приведенные в работе [7], имеют довольно громоздкий вид. Для оценочных расчетов они могут быть аппроксимированы с помощью выражений ($\eta > 0.5$):

$$F_1(\eta) \cong -0.45 - 2.5/(\eta - 0.5);$$

$$F_2(\eta) \cong 5/\pi(1 - \cos z) - 0.5/\eta \sin 0.1\pi\eta;$$

$$F_3(\eta) \cong 0.22 - 1/(\eta - 0.5),$$

где ρ_0, ρ – среднее и мгновенное значения плотности соответственно; ось ox направлена параллельно скорости набегающего потока; oy – перпендикулярно к обтекаемой поверхности, начало координат расположено на передней кромке; $\text{Re} = xU_0/\nu$, ν – кинематический коэффициент вязкости; $\eta = y\sqrt{U_0/\nu x}$.

2. ИЗМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТА НЕОДНОРОДНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Анализ показал, что внутри пограничного слоя градиент неоднородности изменяется как по величине, так и по направлению, составляющая $\partial\rho/\partial y$ быстро растет вниз по потоку с ростом числа Рейнольдса, т.е. вектор градиента неоднородности постепенно разворачивается в направлении, перпендикулярном обтекаемой поверхности и растет по абсолютной величине. Например, для точки с координатами $\text{Re}_x = 10^5$, $\eta = 2.5$, $\partial\rho/\partial y \cong -0.94k_1 + 0.7k_2$, $\partial\rho/\partial x \cong 2.1k_1$, а для точки $\text{Re}_x = 5 \cdot 10^5$, $\eta = 1.2$, $\partial\rho/\partial y \cong 1400k_1 + 0.3k_2$, $\partial\rho/\partial x \cong 6.4k_1$. Следовательно, при движении жидкости в пределах пограничного слоя происходит трансформация неоднородности, причем характер трансформации зависит как от параметров течения, так и от параметров неоднородности жидкости. Сопоставляя данные для точек $\text{Re}_x = 10^5$ и $\text{Re}_x = 5 \cdot 10^5$ с соответствующими $\eta = 2.5$ и $\eta = 1.2$, видно, что градиент $\partial\rho/\partial y$ возрос от 0.94 до 1400, а градиент $\partial\rho/\partial x$ возрос от 2.1 до 6.4. Становится очевидным, что в пограничном слое имеется значительное усиление градиентов неоднородностей по сравнению со свободным потоком. Это согласуется с результатами работы [3], в которой приведены экспериментальные исследования трансформации температурных неоднородностей в пограничном слое на плоской пластине. В этой работе использовались контактные датчики (термисторы) для регистрации распределений температуры.

Описанный эффект усиления градиента плотности в сдвиговом потоке может быть использован для увеличения чувствительности теневых приборов, в которых распределение интенсивности

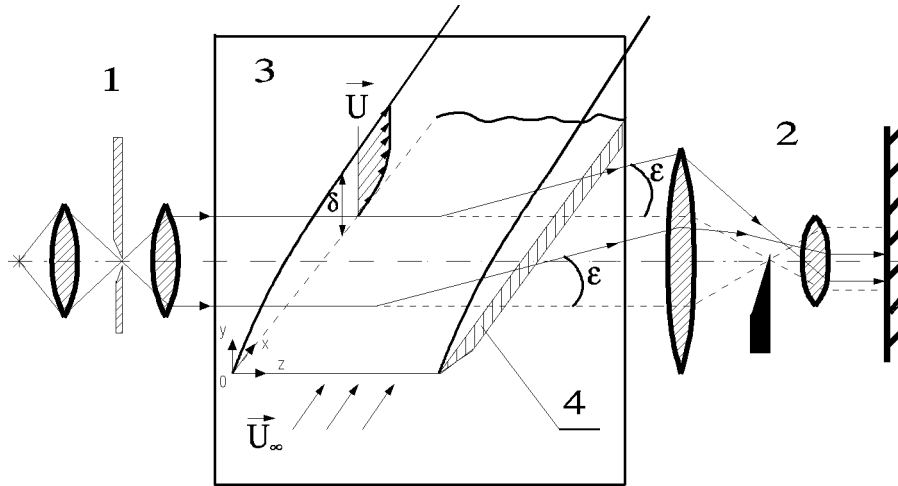


Рис. 2. Схема расположения плоской пластины в зоне анализа теневого прибора: 1 – осветительная часть, 2 – измерительная часть прибора, 3 – зона анализа, 4 – плоская пластина.

освещенности в плоскости изображения пропорционально градиенту показателя преломления (прибор Теплера). Для этой цели в рабочем участке аппаратуры устанавливают (рис. 2) параллельно оптической оси плоскую пластину так, чтобы угол между вектором скорости U_0 и плоскостью пластины был не более 0.15 рад.

Появление на теневой картине изображения области пограничного слоя в виде контрастных зон, вытянутых вдоль изображения ребра пластины, является свидетельством существования в набегающем потоке слабого градиента неоднородности. Тогда на теневой картине существующие в потоке плоскостные (оптические) неоднородности будут выглядеть в виде контрастных зон, вытянутых вдоль ребра пластины. Измерив углы отклонения лучей, прошедших через эту неоднородность, можно определить распределение показателя преломления в пограничном слое [9], по которому, в свою очередь, можно рассчитывать градиент плотности в набегающем потоке. Учítывая, что

$$\frac{1}{1-n} \frac{\partial n}{\partial \eta} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \eta} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{\nu x}{U_0}} \frac{\partial \rho}{\partial y},$$

получаем:

$$\eta(\eta) = n_0 - (n_0 - 1)[x(k_1 \cos \beta + k_2 \sin \beta) \int_{\eta_0}^{\eta} F_2 d\eta + (k_2 \cos \beta + k_1 \sin \beta) \int_{\eta_0}^{\eta} \sin \frac{\pi}{10} \eta d\eta],$$

где n_0 – значение коэффициента показателя преломления в точке $\eta_0 > 0.5$ входа невозмущенного луча света, направленного параллельно оси z .

Среднее значение \bar{n} на границе пограничного слоя найдем как:

$$\begin{aligned} \bar{n} = n_0 - (n_0 - 1)[x(k_1 \cos \beta + k_2 \sin \beta) \times \\ \times (1.1 - 0.2\eta - \ln \frac{4.5}{\eta_0 - 0.5}) + \sqrt{\frac{\nu x}{U_0}} \frac{10}{\pi} \times \\ \times (k_1 \sin \beta + k_2 \cos \beta) \cos \frac{\pi}{10} \eta_0]. \end{aligned}$$

Для луча света, вышедшего за пределы пограничного слоя, выполняется соотношение [9]:

$$\operatorname{tg} \varepsilon \cong \sqrt{\left(\frac{\pi}{n(\eta_0)}\right)^2 - 1},$$

где ε – угол между вышедшим лучем и осью z (см. рис. 2). Следовательно,

$$\operatorname{tg} \varepsilon \cong \left\{ \frac{1}{\rho} \left(1 - \frac{1}{\pi}\right) 6x \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \cos \beta + \frac{\partial \rho}{\partial y} \sin \beta \right) \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь $\eta = 0$. Измерив ε для двух значений x , можно из полученной системы из двух алгебраических уравнений найти величину градиента неоднородности набегающего потока.

Явление усиления градиента неоднородности в пограничном слое можно использовать для сокращения расстояния между источником света и приемником, что удобно при работе с замутненной жидкостью. Так, если в набегающем потоке $\partial \rho / \partial x \neq 0$, то для получения одной и той же величины угла отклонения луча света расстояние L_1 между источником света и приемником будет относиться к расстоянию L_2 при использовании эффекта пограничного слоя как

$$\frac{L_1}{L_2} \cong (\operatorname{Re})^{\frac{1}{4}}.$$

Следует, однако, отметить, что введение пластины в просмотровую зону теневого прибора для увеличения чувствительности приводит к сильному искажению формы регистрируемых возмущений за счет их деформации в пограничном слое пластины.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования движущейся неоднородной жидкости в ламинарном пограничном слое полубесконечной пластины проведены с помощью дистанционного теневого визуализатора оптических неоднородностей ДТВН, описанного в работе [10]. Плотностные неоднородности создавались с помощью хорошо обтекаемого электрического нагревателя, устанавливаемого выше по потоку перед входом в просмотровый объем прибора. Параметры получаемой неоднородности регулировались с помощью изменения длительности и напряжения импульсов тока.

В просмотровом объеме прибора устанавливалась плоская пластина параллельно набегающему потоку и оптической оси прибора (см. рис. 2). Характерное изображение получаемых неоднородностей на экране ДТВН представлено на рис. 3. Из рис. 4, где показано, как деформировались плотностные неоднородности в пограничном слое, видно, что в невозмущенном потоке (выше штриховой линии) градиент плотности, в основном, параллелен плоскости пластины, а в пределах пограничного слоя его направление становится почти перпендикулярным к пластине и контрастность изображения неоднородностей увеличивается.



Рис. 3. Характерное изображение оптической неоднородности потока на экране теневого прибора

Результаты данной работы согласуются с известными положениями [11, 12], что при обтека-

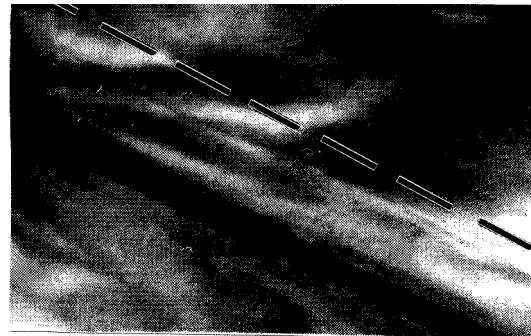


Рис. 4. Деформация поля неоднородности в ламинарном пограничном слое: темная полоса – изображение ребра пластины, штриховая линия – примерная граница пограничного слоя

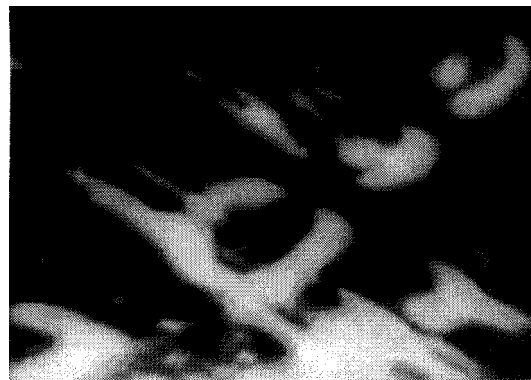


Рис. 5. Деформация поля неоднородности в переходном пограничном слое на вогнутом зеркале прибора

нии вогнутой поверхности при малом радиусе кривизны течение становится неустойчивым при малых числах Рейнольдса, и в нем развиваются парно противоположно вращающиеся вихри с осями, вытянутыми вдоль потока, так называемые "вихри Тейлора-Гертлера". Течение теряет устойчивость, когда число Гертлера $G = U_0 \delta / \nu \cdot \sqrt{\delta / r}$ ($\delta = 5 \sqrt{\nu x / U_0}$ – толщина пограничного слоя, r – радиус кривизны поверхности), причем длина волны возникающих вихрей $\lambda \cong 2\delta$. В опытах нагреватель устанавливался так, чтобы плотностные неоднородности попадали в область у поверхности сферического отражающего зеркала, имеющего определенный радиус кривизны. При данных скоростях потока образовывались условия для возникновения вихрей Тейлора-Гертлера на поверхности зеркала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что деформация поля неоднородностей, существующих в потоке, в пограничном слое приводит к существенному увеличению градиента неоднородности. Этот эффект может быть использован для увеличения чувствительности теневых приборов путем установки в просмотровом объеме теневого прибора плоской пластины. Сдвиговые течения в пограничном слое, возникающем на пластине, обуславливают деформацию существующего в невозмущенном потоке распределения неоднородностей плотности (оптического показателя преломления) и обострение градиентов этих неоднородностей. Это приводит к тому, что теневые приборы регистрируют слабые тепловые неоднородности, которые ранее не регистрировались. Однако увеличение чувствительности прибора путем использования эффекта усиления градиента оптического показателя преломления в пограничном слое сопровождается заметным искажением формы неоднородности. Тем не менее, использование указанного эффекта является довольно перспективным с точки зрения повышения чувствительности теневых приборов.

Таким образом, эффект усиления градиента оптического показателя преломления может быть использован для увеличения чувствительности теневых приборов. Однако указанный эффект может приводить к появлению систематических ошибок в показателях приборов из-за наличия пограничных слоев, образующихся на поверхностях, ограничивающих просмотровый объем. Ситуация существенно изменится, если форма обтекаемой поверхности будет искривленной. Например, в конструкциях приборов, в частности ДТВН, одна из поверхностей является сферической (вогнутое зеркало). На рис. 5 показано, как исказилась по сравнению с рис. 3 область нагретой жидкости, что объясняется влиянием вихрей, возникших в пограничном слое у поверхности зеркала. В опытах параметры были следующие:

щие: $G \cong 40$, $U_0 \cong 0.05$ м/с, $\delta = 7$ мм, $\lambda \cong 15$ мм. Следовательно, при изучении движущейся неоднородной жидкости применение теневых приборов с вогнутыми зеркалами может вызывать существенные трудности при интерпретации показаний прибора.

1. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов.– М.: Гидрометеониздат, 1983.– 296 с.
2. Майкл С. Грегг Наука об океане. Микроструктура океана.– М.: Прогресс, 1981.– 222 с.
3. Никишова О.Д., Никишов В.И., Олексюк В.В. Нестационарный конвективный теплоперенос в пограничном слое неоднородной жидкости // Прикладна гідромеханіка.– 1999.– Том 1 (73), N 3.– С. 24-31.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача.– М.: Энергия, 1969.– 439 с.
5. Прандтль Л. Гидроаэромеханика.– М.: ИЛ, 2002.– 572 с.
6. Турчак Л.И., Шидловский В.П. Об уравнениях движения стратифицированной жидкости // ДАН СССР.– 1980.– 254 No 4.– С. 317.
7. Козлов Л.Ф., Никишова О.Д. Стратифицированный ламинарный пограничный слой//Гидромеханика.– Наук. думка.–1984.–52.– С. 47-52.
8. Никишова О.Д., Откаленко О.О. Эволюция поля неоднородности в пограничном слое.// Гидромеханика // К.– 1989.– 60.– С. 37-40.
9. Зимин В.Д. Оптические методы исследования прозрачных неоднородностей.– Пермь.– 1976.– 92 с.
10. Авраменко А.С., Дурович Э.Ю., Наумов Б.В. Измерение чувствительности теневых приборов со сферическим автоколлимационным зеркалом // ОМП.– 1983.– 9.– С. 40-43.
11. Görtler H. Über eine dreidimensionale Instabilität laminarer Grenzschichten an konkaven Waden // Nachgr. Ges. Wiss. Gottingen. Math.-Phys. Klasse.– 1940.– 1 No2.– P. 1-26.
12. Nikishova O.D., Oleksyuk V.V. The Taylor-Görtler vortices on moving along curved trajectory surface // Abstracts of 8th Couette-Taylor Meeting. Spatio-Temporal properties of centrifugal instabilities. NATO International Scientific Exchange Programmes. Institut Non Linéaire de Nice.– 1993.– March 28-29.– P. 79-80.