

УДК 536.25

# НЕСТАЦИОНАРНЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

О.Д. НИКИШОВА, В.И. НИКИШОВ, В.В. ОЛЕКСЮК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 10.06.99

Приведены результаты экспериментальных исследований трансформации поля температуры в ламинарном пограничном слое плоской пластины при обтекании ее потоком неоднородной жидкости. Изучены два типа распределений температуры во внешнем потоке: скачкообразное и периодическое. Показано, что под действием сдвига скорости в пограничном слое происходит поворот изотерм и возникает вертикальная составляющая градиента температуры. Получены экспериментальные данные, характеризующие зависимость распределения амплитуды возмущений по толщине пограничного слоя. Обнаружено, что глубина проникновения возмущений температуры зависит от их длины волны. Продемонстрирована фильтрующая способность пограничного слоя, в котором обнаружено формирование тонких прослоек с высокими градиентами температуры (высокоградиентные прослойки).

Приведено результати експериментальних досліджень перетворення поля температури у ламинарному пограничному шарі плоскої пластини, коли вона обтікається потоком неоднорідної рідини. Вивчено два типи розподілу температури у зовнішньому потоці: стрибкоподібне та періодичне. Показано, що під дією зсува швидкості у пограничному шарі відбувається поворот ізотерм і виникає вертикальна компонента градієнта температури. Отримано експериментальні дані, що характеризують залежність розподілу амплітуди збурень по товщині пограничного шару. Показано, що глибина проникнення збурень температури залежить від єї довжини хвилі. Продемонстровано фільтруючу спроможність пограничного шару, у якому знайдено формування тонких прошарків з високими градієнтами температури (високоградієнтні прошарки).

The results of the experimental investigations of the temperature field transformations within a laminar boundary layer over flat plate are presented. Two types of the temperature distributions (stepwise and periodical) are studied. It is shown that the isotherms turn in the boundary layer under action of the velocity shear and the vertical component of the temperature gradient arises. The experimental data characterizing the distribution of the disturbance amplitude of the temperature in the boundary layer are obtained. It is found that the penetration depth of the temperature disturbances depends on the wave length. It is demonstrated that a boundary layer has the filtering properties. The formation of the thin layered structures with high gradient of temperature (high gradient layer) is found.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие процессов тепломассопереноса в поле течений при наличии сдвига скорости существенно отличается от случая неподвижной жидкости. Под действием сдвига происходит деформация скалярных полей, изменяются их градиенты и, соответственно, потоки тепла и массы.

В свободных течениях стратифицированной по температуре (солености) жидкости сдвиг скорости приводит к деформации скалярных полей, вызывает увеличение их градиентов. Более того, возмущения гидродинамических скалярных полей затухают с разными скоростями в отличие от бессдвигового течения, когда эти скорости равны друг другу [1].

Наиболее выражено влияние эффектов сдвига проявляется при наличии твердых обтекаемых поверхностей, на которых развивается пограничный слой. При обтекании потоком воды нагретой пластины за счет эффектов сдвига теплообмен пластины с окружающей средой резко возрастает [2]. Совместное влияние сдвига и теплопроводности

приводит к изменению распределения температуры и формированию температурного пограничного слоя. Существенная деформация скалярных полей происходит и при обтекании пластины неоднородной жидкостью. Градиенты скалярных полей могут возрастать в сотни раз вблизи пластины, если не учитывать процессы теплообмена между жидкостью и пластиной [3]. Аналогичные эффекты имеют место при течении неоднородных жидкостей в трубах [4]. Учет влияния молекулярных эффектов на распределение температуры в ламинарном пограничном слое осуществлен в работе [5]. Авторы рассматривали обтекание пластины потоком неоднородной нагретой вязкой теплопроводной жидкости, а на поверхности пластины принимались условия адиабатичности:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0. \quad (1)$$

Рассматривались слабые температурные неоднородности, поэтому предполагалось, что их влияние на основное течение мало. В соответствии с численным решением нестационарного уравне-

ния переноса температуры показано, что величина вносимых пограничным слоем искажений зависит от конкретного распределения температуры в начальном сечении. Было продемонстрировано, что в пограничном слое могут формироваться тонкие прослойки, характеризующиеся высокими градиентами температуры. Отметим, что подобные высокоградиентные прослойки наблюдались в ламинарном следе за сферой, движущейся в стратифицированной по плотности жидкости [6]. Причина их возникновения связана со сдвиговыми эффектами в пограничном слое.

Таким образом, даже при малых перепадах скалярных полей в набегающем потоке жидкости в пограничном слое за счет эффектов сдвига происходят значительные искажения этих полей, что приводит к появлению высокоградиентных прослоек. Эти искажения могут приводить к ошибкам измерений характеристик скалярных полей контактными датчиками, а также вносить значительные погрешности в показания оптических приборов, используемых для регистрации изменений скалярных полей в пограничном слое.

В связи с важностью описанных явлений для практических целей, в данной работе приведены результаты исследований характеристик нестационарного скалярного поля, в частности, температуры, в ламинарном пограничном слое.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Экспериментальные исследования процессов теплопереноса в ламинарном пограничном слое проводились в открытом лотке, поперечное сечение которого составляло  $40 \times 40$  см. В голове лотка был установлен водорезистивный нагреватель, принцип работы которого описан в [7]. К нагревателю подведена высокочастотная электроэнергия от специальных источников электропитания. Нагреватель выполнен в виде двух мелкоячеистых сеток из электропроводящего материала. Вода, проходя межсеточный объем, нагревается согласно закону Джоуля-Ленца, так как сама является в данном случае электропроводящей средой. Количество тепла, выделяемое при прохождении электрического тока через определенный объем проводника, зависит от величины приложенного напряжения, от электрического сопротивления проводника и от времени прохождения электротока через проводник. Сетки являются одновременно элект-

родами нагревателя и детурбулизаторами потока. В данных экспериментах сетки нагревателя перекрывали все поперечное сечение лотка, в результате чего в потоке могло создаваться неоднородное по горизонтали распределение температуры. Управление параметрами температурного поля осуществлялось путем модуляции электрического напряжения, подаваемого на нагреватель.

Очевидно, что поток жидкости с неоднородным распределением температуры вдоль оси лотка и однородным в поперечном направлении (за исключением пристенных областей) является неустойчивым. В результате развития неустойчивости в потоке возникают конвективные течения, которые вызывают искажения распределения температуры.

Анализ таких течений и их влияние на поле температуры выполнен в работе [5]. Как показали оценочные расчеты, возникающие конвективные течения действительно искажают первоначальный профиль температуры. Эти искажения, как и следовало ожидать, возникают вблизи верхней и нижней границ лотка. Далее вниз по потоку область их влияния расширяется и постепенно достигает центральной части лотка. Исходя из проведенного анализа, область рабочего участка лотка ограничена вдоль оси  $x$  и на расстоянии более 1 м от нагревателя измерения не проводились.

Изучались два типа распределений температуры, которые создавались нагревателем в начальном сечении лотка:

- скачкообразное изменение температуры (ступенька);
- периодическое изменение температуры.

Область сдвига создавалась путем установки в лотке плоской горизонтально расположенной пластины из оргстекла длиной 1.5 м. Толщина пластины составляла 1.5 см с заостренной обивальной носовой частью. Развивающийся на пластине ламинарный пограничный слой вызывал деформацию температурного поля и приводил к изменению параметров теплопереноса. Измерение температуры проводили с помощью специального измерителя температуры, в котором в качестве чувствительного элемента использовался термистор МТ-54. Размер чувствительной головки составлял 0.8 мм. Калибровка прибора выполнялась путем сравнения данных с показаниями ртутного термометра в канале и в неподвижной жидкости.

Скорость потока измерялась прибором ИТП-1М, созданным в НТУУ "КПИ", чувствительным элементом которого тоже являлся термистор. Калибровка прибора выполнялась периодически в

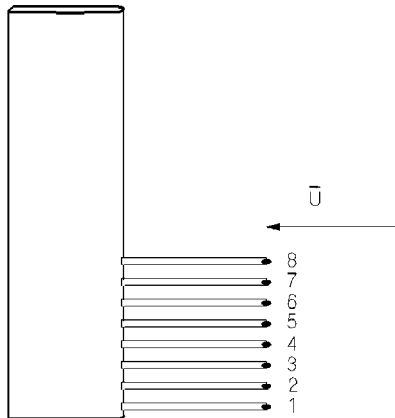


Рис. 1. Гребенка термисторов (схема)

процессе проведения экспериментов.

Отметим, что основные эксперименты осуществляли при скорости потока 1.56 см/с. Перепад температуры составлял 0.2 градуса Цельсия. Для проведения более детальных измерений распределения температуры поперек пограничного слоя была изготовлена гребенка, объединяющая 8 термисторов (рис. 1). Расстояние между соседними термисторами составляло приблизительно 2 мм. Сигналы от термисторов подавались на восьми-канальный усилитель и регистрировались восьми-канальным самописцем.

### СКАЧКООБРАЗНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты измерений изменений температуры гребенкой термисторов, установленной поперек пограничного слоя вблизи пластины. В нижней части рисунка изображены метки времени с шагом 10 секунд. Измерения проводили на расстоянии 20 см от передней кромки пластины. Видно, что верхние датчики, находящиеся вне пограничного слоя, регистрируют ступенчатое изменение температуры, в то время как нижние датчики, расположенные внутри пограничного слоя, показывают плавное нарастание температуры. В результате в пограничном слое под действием сдвига происходит поворот изотерм и возникает вертикальная составляющая градиента температуры, отсутствующая вне пограничного слоя.

Отметим, что аналогичный поворот линий рав-

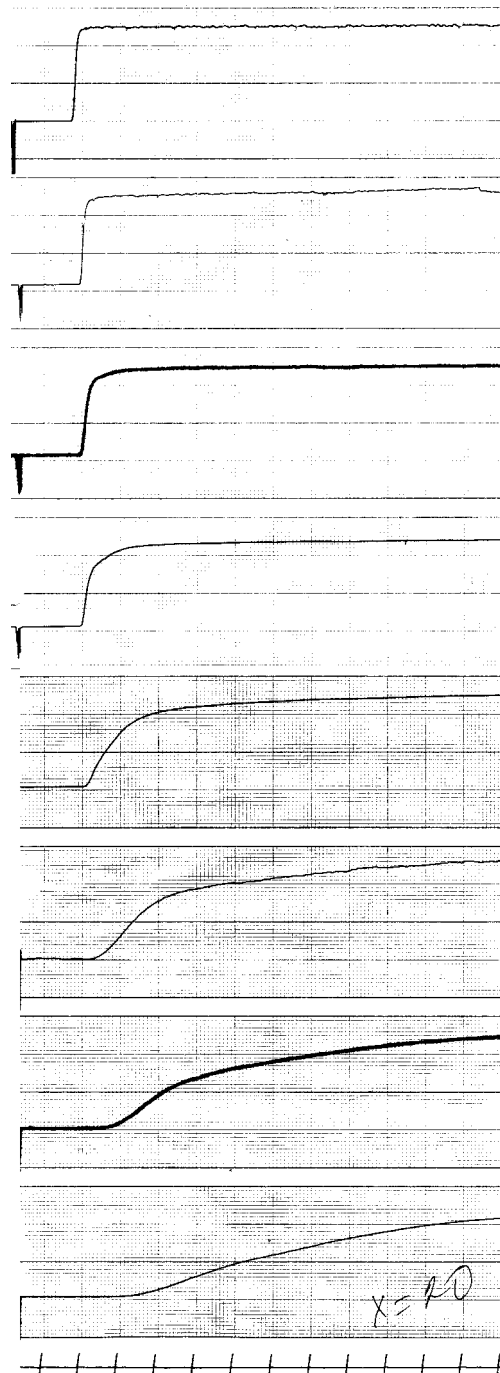


Рис. 2. Изменение температуры по толщине пограничного слоя

ной плотности в свободных сдвиговых потоках рассматривался в работах [6, 8].

Для изучения характера эволюции ступенчатого распределения температуры по длине измерения проводили также на расстоянии 100 см от переднего края пластины. Результаты измерений

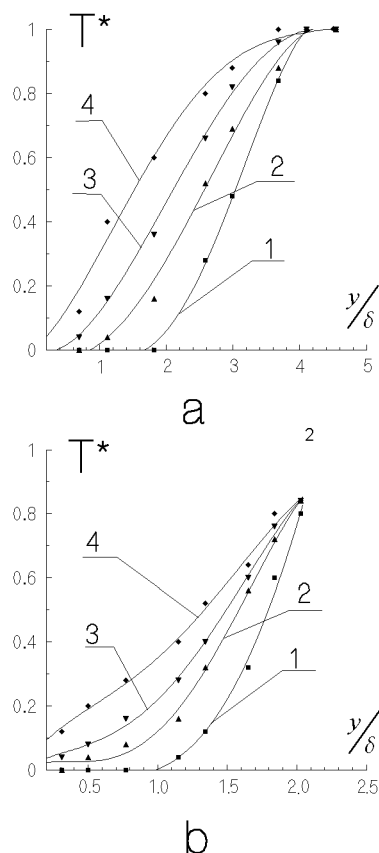


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры  
 "а" –  $x_1 = 20$  см; 1 –  $t = 6.7$  с; 2 –  $t = 11.2$  с;  
 3 –  $t = 15.7$  с; 4 –  $t = 26.4$  с;  
 "б" –  $x_2 = 100$  см; 1 –  $t = 15$  с; 2 –  $t = 25$  с;  
 3 –  $t = 35$  с; 4 –  $t = 55$  с

вертикального распределения температуры представлены на рис. 3. По оси абсцисс отложена вертикальная координата  $y$ , нормированная по толщине пограничного слоя  $\delta$ , соответствующая данному расстоянию  $x_i$ . По оси ординат отложены значения температуры жидкости  $T^*$ , нормированные на величину перепада температуры во внешней зоне, то есть  $\Delta T^* = 1$  соответствует перепаду температуры в ступеньке.

Отметим, что времена измерений выбирались из условия равенства обезразмеренных значений времени:

$$T^*_i = t \sqrt{\frac{V^3}{\nu x_i}}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – положение сечения, в котором производится измерение.

Так, момент времени  $T = 15$  с в сечении  $x_3 = 100$  см соответствует моменту времени  $T = 6.7$  с

Табл. 1. Значения "сходственных" времен

nn	$t$ (сек)	$t$ (сек)	$t$ (сек)	$t$ (сек)
$x=20$ см	6.7	11.2	15.7	26.4
$x=100$ см	15	25	35	55

в сечении  $x_1 = 20$  см. На рис. 3 эти данные изображены одинаково, т.е. квадратами. Такая же процедура осуществлена и для остальных времен измерений. В табл. 1 приведены значения этих "сходственных" времен.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, а, можно видеть, что с течением времени происходит изменение профиля температуры. При этом верхние датчики в гребенке, находящиеся вне пограничного слоя, регистрируют постоянную температуру. По мере нарастания пограничного слоя вдоль потока гребенка полностью находится внутри пограничного слоя (рис. 3, б), и регистрируемая верхними датчиками температура жидкости меньше, чем температура жидкости вне пограничного слоя. На этом рисунке видно постепенное изменение профиля температуры со временем в каждом сечении.

Как отмечалось выше, основное внимание в работе уделено изучению высокоградиентных прослоек. Для этого на основе приведенных данных получены регрессионные зависимости в виде полиномов 4-й степени (кривые 1 – 4).

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

Результаты расчета вертикальной составляющей градиента температуры с использованием указанных регрессионных зависимостей представлены на рис. 4. Цифрой 1 обозначены кривые, соответствующие первому значению "сходственного" времени, в частности, при  $x = 20$  см это соответствует  $T = 6.7$  с. Цифрой 2 обозначены кривые, соответствующие второму значению, цифрой 3 – третьему и цифрой 4 – четвертому. Как и следовало ожидать, уже в сечении  $x = 20$  см при  $T = 6.7$  с профиль вертикальной составляющей градиента температуры имеет максимум. Его появление обусловлено тем, что вблизи верхней границы пограничного слоя распределение

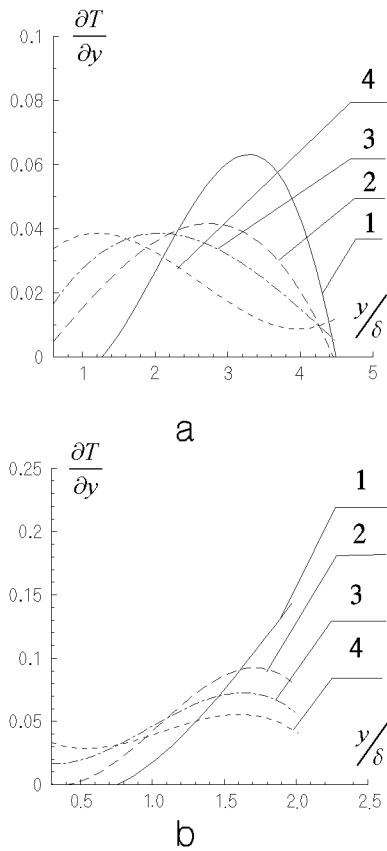


Рис. 4. Распределение вертикальной составляющей градиента температуры

температуры становится близким к распределению во внешнем потоке, где вертикальная компонента градиента температуры равна нулю. В пристеночной области под влиянием температуропроводности также происходит выравнивание температуры и, следовательно, уменьшение градиента.

При измерениях в сечении  $x = 100$  см (рис. 3, б и 4, б) все датчики находились внутри пограничного слоя. Поэтому при больших значениях  $y/\delta$  кривые обрываются. Видно, что со временем в донном сечении происходит уменьшение вертикальной составляющей градиента температуры. Важно отметить, что значение этой составляющей растет вниз по потоку, если сравнивать кривые, соответствующие "сходственному" времени (на рис. 3 и 4 такие кривые обозначены одним номером). Кроме того, размеры зоны высоких значений градиента уменьшаются. Другими словами, происходит локализация области высокого градиента, значение самого градиента возрастает. Затем происходит постепенное уменьше-

ние значения этой составляющей. Таким образом, из анализа полученных результатов следует, что в области пограничного слоя происходит существенная деформация скалярного поля. При этом возникает вертикальная составляющая градиента этого поля, отсутствующая во внешней зоне, и формируются локализованные области, характеризующиеся высокими значениями вертикальной составляющей градиента этого поля (высокоградиентные прослойки).

### ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Периодические, вдоль оси потока, возмущения температуры создавались с помощью описанного выше ввода резистивного нагревателя путем периодической модуляции подаваемого на него напряжения. В результате в потоке жидкости возникали периодические изменения температуры заданного периода (длины волны  $\lambda$ ). Измерения проводились сначала вблизи пластины. Расстояние от центра нижнего датчика до пластины составляло 2.7 мм. Затем гребенка поднималась вверх так, чтобы новое положение нижнего датчика совпадало с предыдущим положением верхнего датчика, то есть имело место перекрытие гребенкой области измерения. Отметим, что форма сигнала каждого датчика практически не изменялась во времени. Это дало основание сопоставление данных по фазе и представить общую картину изменений температуры на разных уровнях по толщине пограничного слоя  $\delta$ . Исследования развития периодических возмущений температуры проводились для различных длин волн.

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты измерений изменения температуры поперек пограничного слоя на расстоянии 20 см от носика пластины. Цифрами обозначены обезразмеренные по толщине пограничного слоя  $\delta$  значения вертикальной координаты  $y/\delta$ . Длина волны периодических изменений температуры, создаваемых нагревателем, составляла в этом эксперименте  $\lambda/\delta = 15$ . На рис. 6 представлены результаты измерений длинноволновых возмущений изменения температуры для  $\lambda/\delta = 46$ .

Видно, что по мере приближения к стенке происходит искажение формы сигнала и изменение его фазы, а амплитуда изменений температуры уменьшается. Более того, вблизи стенки амплитуда возмущений резко уменьшается и кривые ста-

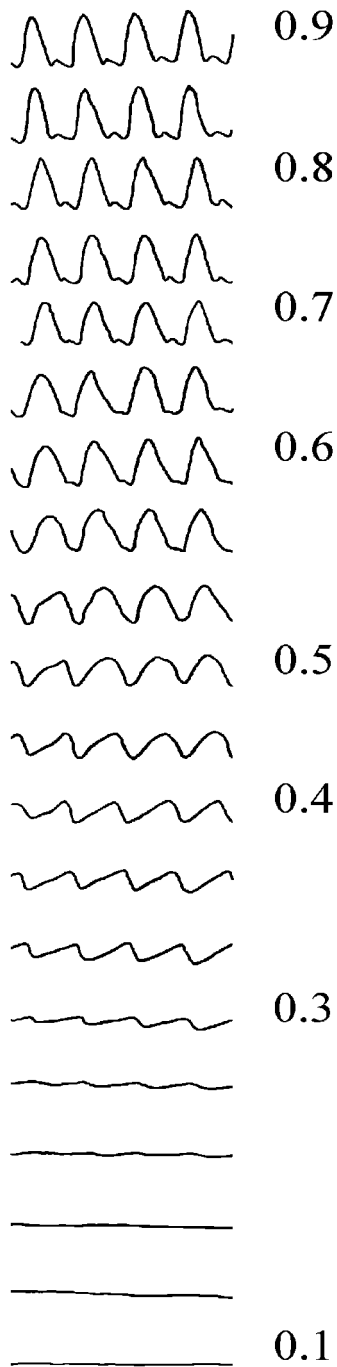


Рис. 5. Трансформация периодического изменения температуры в пограничном слое ( $\lambda/\delta = 15$ )

новятся практически прямыми линиями. Такие изменения поля температуры обусловлены влиянием сдвига скорости в пограничном слое, которое приводит к появлению вертикальной составляющей градиента температуры и интенсификации процесса теплообмена. Такая картина деформации

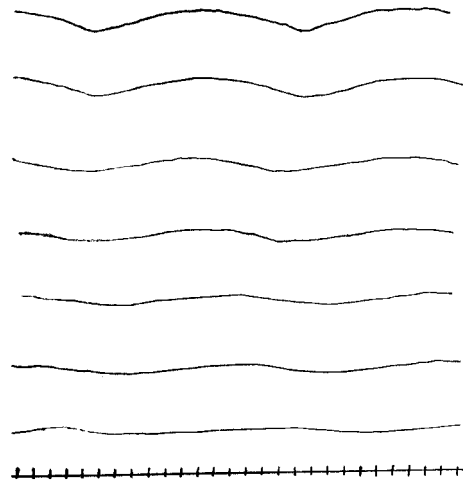


Рис. 6. Трансформация периодического изменения температуры в пограничном слое ( $\lambda/\delta = 46$ )

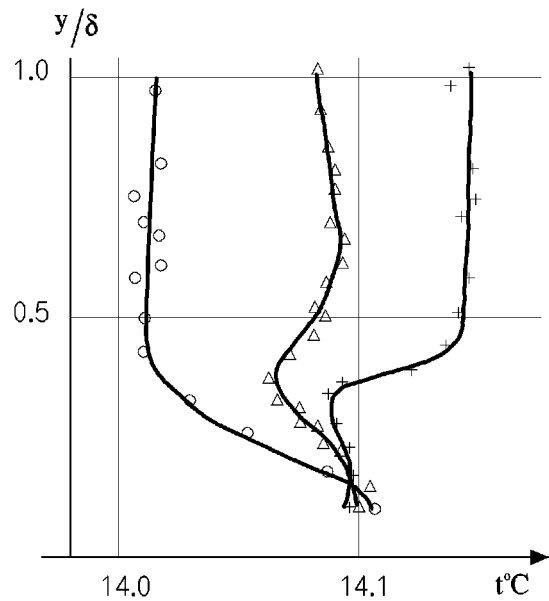


Рис. 7. Распределение температуры по вертикали для разных фаз колебаний (короткие волны)

ционной перестройки поля температуры в значительной степени зависит также от длины волны изменений температуры  $\lambda$ . На рис. 7, 8 представлены распределения температуры поперек пограничного слоя для разных фаз периодических возмущений во внешнем потоке. Отметим, что вне пограничного слоя изменение температуры носило синфазный характер по глубине. Рассматривались три характерные фазы возмущений: гребень, подошва и среднее положение между гребнем и подошвой.

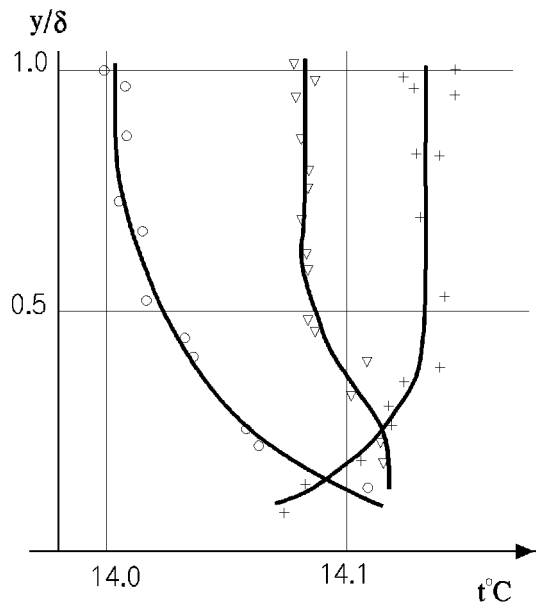


Рис. 8. Распределение температуры по вертикали для разных фаз колебаний (длинные волны)

Данные, относящиеся к измерениям, связанным с гребнем возмущений во внешнем потоке, обозначены на рис. 7, 8 в виде кружков; связанные с подошвой – в виде крестиков и со средним положением – в виде треугольников. Видно, что как и в случае ступенчатого распределения температуры внутри пограничного слоя появляется вертикальная составляющая градиента температуры. Знак этой составляющей меняется в зависимости от фазы возмущений во внешнем потоке. Важно отметить, что указанная составляющая становится пренебрежимо малой вблизи стенки в случае коротковолновых возмущений вне зависимости от фазы колебаний (рис. 7). В то же время, для длинноволновых возмущений (см. рис. 8) вертикальная составляющая градиента температуры существует в пристенной области и может быть зарегистрирована измерительными приборами.

Следует выделить еще одну характерную особенность развития периодических возмущений температуры – возникновение тонких высокоградиентных прослоек в пограничном слое (см. рис. 7). Таким образом, имеет место заметное выравнивание распределения температуры в случае коротковолновых возмущений, в то время как длинноволновые возмущения претерпевают заметно меньшие искажения.

Другими словами, пограничный слой обладает своеобразной фильтрующей способностью: кратковременные периодические возмущения темпера-

туры не проникают в пристенную зону, а длинноволновые могут быть зарегистрированы. Исследования трансформации периодических возмущений внутри пограничного слоя были проведены для пяти значений длин волн. Результаты измерений изменений амплитуды возмущений по толщине пограничного слоя представлены на рис. 9. Здесь по оси ординат отложены значения вертикальной координаты  $y/\delta$ , по оси абсцисс – амплитуда возмущений, нормированная по амплитуде возмущений, находящихся во внешней зоне. Заметно резкое уменьшение амплитуды для малых  $\lambda/\delta$  в пристенной области.

## ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали, что пограничный слой обладает специфическими фильтрующими свойствами для определенных примесных неоднородностей – в данном случае для тепловых неоднородностей. На рис. 2, 5 и 6 видно, что низкие частоты фильтруются, то есть проникают, а высокие не проникают в пограничный слой.

С точки зрения теории передачи сигналов, устройство, избирательно пропускающее определенные частоты и не пропускающее иные частоты, является фильтром. В данном случае имеется налицо отчетливо просматриваемая частотно-зависимая характеристика передаточной функции пограничного слоя как пассивного фильтра низких частот (ФНЧ). Так, по форме искажения фронта импульса (затягивание) и по изменению наклона "крыши" импульса ("скол" импульса) можно судить о частотно-фазовой характеристике устройства, через которое пропускается испытательный импульс. Затягивание фронта – это "завал" высоких, а скол крыши – это "завал" низких частот [9]. Проводя аналогии с вышесказанным, можно утверждать, что с точки зрения спектрального анализа пограничный слой обладает фильтрующими свойствами фильтра нижних частот.

Результаты исследований, представленные на рис. 5 и 6, подтверждают вывод о том, что высокие частоты сильно затухают в пограничном слое. Более низкие частоты (см. рис. 6) проникают гораздо глубже в пограничный слой, то есть здесь отчетливо просматривается частотно-зависимая передаточная функция пограничного слоя как фильтра низких частот.

Анализ полученных результатов показывает, что влияние пограничного слоя на измерения ска-

лярных полей проявляется в том, что происходит определенное искажение истинных значений, в частности, для произвольного возмущения может быть зарегистрирована только низкочастотная часть, в то время как высокочастотная составляющая исчезает из-за влияния молекулярных процессов переноса. Представленная в графическом виде на рис. 9 передаточная функция погранич-

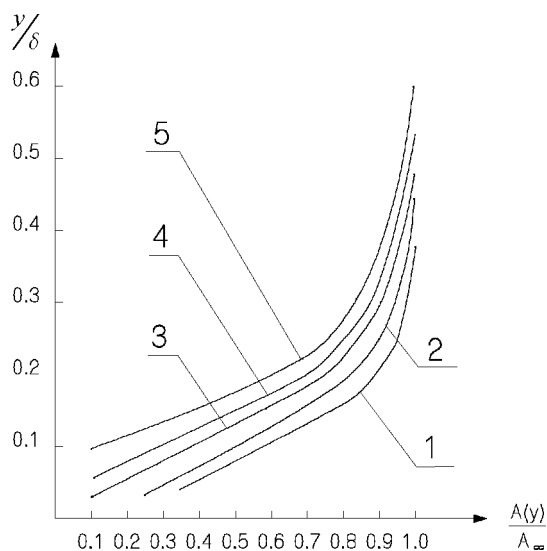


Рис. 9. Изменения амплитуды колебаний температуры по толщине пограничного слоя

ного слоя наглядно демонстрирует указанные особенности трансформации возмущений поля температуры. Здесь кривая 1 соответствует частоте возмущений температуры, равной 0.004 Гц, кривая 2 – частоте 0.008 Гц, кривая 3 – 0.02 Гц, кривая 4 – 0.04 Гц, кривая 5 – 0.08 Гц.

Также необходимо отметить, что градиент поля температуры разворачивается и изменяет свою величину во много раз 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.

1. Никишов В.И. Вырождение мелкомасштабных возмущений в стратифицированной среде // Методы гидрофизических исследований. Турбулентность и микроструктура. – Материалы 3-й Всесоюзной школы-семинара (Светлогорск, 1989). – Новгород: Институт прикладной физики АН СССР. – 1990. – С. 56-71.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М: Наука, 1973. – 848 с.
3. Козлов Л.Ф., Никишова О.Д. Стратифицированный ламинарный пограничный слой // Гидромеханика. – 1985. – Вып. 52. – С. 47-52.
4. Taylor G.I. The dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube // Proc. Roy. Soc. – 1953. – A219. – P. 186-203.
5. Никишова О.Д., Откаленко О.О., Олексюк В.В. О нестационарном конвективном теплопереносе в пограничном слое неоднородной жидкости // Тепломассообмен ММФ – 92, 2-й Минский международный форум (18–22 мая 1992), Том 1, часть 2, Конвективный тепломассообмен. – Минск. – 1992. – С. 104–107.
6. Абалаков О.В., Воейков И.В., Чашечкин Ю.Д. Вихревые структуры в спутном стратифицированном течении за цилиндром // Методы гидрофизических исследований. Лабораторное моделирование геофизических течений. Тез. докл. 3-й Всесоюзной школы – семинара (Светлогорск, 1989) // Калининград. – Институт проблем механики АН СССР. – 1989. – С. 12.
7. Никишова О.Д., Олексюк В.В. Методы создания стратификации в потоке жидкости // Препринт N 1, Ин-т гидромеханики АН УССР. – Киев. – 1991. – С. 15.
8. Филипс О. Динамика верхнего слоя океана. – М: Мир, 1969. – 267 с.
9. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М: Советское радио, 1971. – 672 с.