

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В КАНАЛАХ СО СТРУКТУРНОЙ УПАКОВКОЙ

Б.В. ПЕРЕПЕЛИЦА

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

Проведено экспериментальное исследование распределения температуры и интенсивности температурных пульсаций в потоке воздуха в теплообменнике сложной формы типа “набивки Френкеля”. Измерения выполнены при течении воздуха между двумя гофрированными пластинами с гофрами треугольного сечения, направленными под углом 90° друг к другу. Измерения температуры в потоке проводились специально изготовленным термопарным зондом. Горячий спай термопары не превышал 10 мкм. Анализируется влияние точек контакта и числа Рейнольдса на статистические характеристики температуры в турбулентном потоке при течении воздуха. Основное внимание уделено распределению температуры в элементарной ячейке. Исследования показали существенное различие в распределении температуры в потоке на наветренной и подветренной сторонах канала.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что структура турбулентного потока решающим образом влияет на интенсивность турбулентного переноса тепла. Одним из наиболее сложных процессов для теоретического описания и экспериментального исследования является теплообмен в каналах сложной геометрии. В то же время это одна из наиболее часто используемых систем в теплообменных устройствах различного назначения [1–3]. Существуют многочисленные конструкции компактных теплообменников, обеспечивающих повышенный уровень турбулентности и способствующих организации отрывов и вторичных пристенных течений. Общим для механизма интенсификации теплообмена является организация интенсивных вихревых структур, что приводит к существенному увеличению теплообмена. Трехмерные турбулентные течения в каналах сложной формы сделались в последние десятилетия предметом многочисленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований. К настоящему времени опубликовано большое количество исследований термодинамических характеристик сложных компактных теплообменников. Разработка соответствующих методов расчета турбулентных потоков затруднена из-за отсутствия сколько-нибудь удовлетворительной модели турбулентности для трехмерных течений. Структура турбулентности таких потоков еще недостаточно изучена.

Значительная интенсификация теплоотдачи наблюдается при взаимодействии скрещивающихся потоков жидкости, осуществляемая в теплопередающих элементах типа набивки Френкеля [4–7]. Такого вида поверхность теплообмена (рис. 1) может быть образована из гофрированных пластин, на смежных листах которых

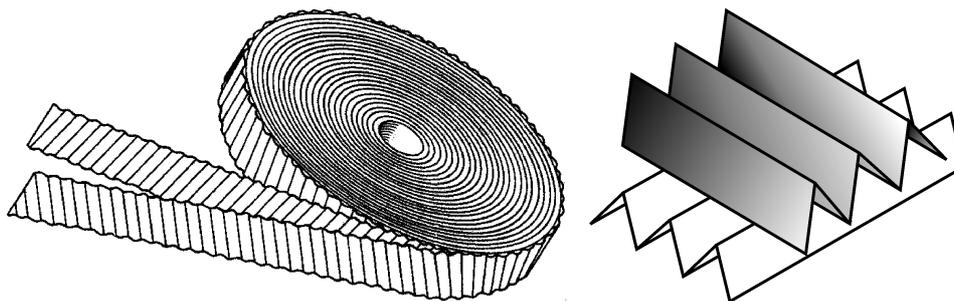


Рис. 1. Насадка низкотемпературных регенераторов из гофрированных металлических лент (набивки Френкеля) и схема каналов в ней.

гофры расположены под некоторым углом друг к другу. Теплопередающие элементы типа “набивки Френкеля” находят широкое применение в различных областях техники благодаря ряду особенностей, свойственных таким поверхностям нагрева (технологичность конструкции, высокая компактность набивки и др.). Пластинчато-ребристая поверхность теплообмена, элементы которой располагаются под некоторым углом к первоначальному направлению движения потока, способна обеспечить высокий уровень теплоотдачи. Данные по распределению трения на стенке, температуры стенки и влиянию числа Re и точек контакта на них даны в работах [8–10]. Большую информацию об общей картине течения в каналах сложной формы могут дать визуальные методы исследования [11].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проведены при течении воздуха между двумя волнистыми пластинами треугольного сечения в диапазоне чисел Рейнольдса от 380 до 8000 ($Re = WD_h/\nu$, где $D_h = 4V/S$ — гидравлический диаметр). Схема рабочего участка представлена в работе [10]. Одна из ребристых пластин шириной 80 мм и длиной 140 мм изготовлена из тонкой нержавеющей ленты толщиной 0,15 мм, другая, длиной 200 мм, — из органического стекла. Геометрические размеры сечения треугольного канала и одной ячейки канала представлены на рис. 2. Металлическая ребристая пластина наклеена на стеклотекстолитовый шаблон такой же формы. Металлическая лента нагревается электрическим током и омывается с одной стороны потоком рабочей жидкости. Омическое сопротивление ленты около 0,012 Ома. Конструкция позволяет подводить ток до 300 А. Обе пластины помещены в канал прямоугольного сечения 40×80 мм изготовленный из оргстекла. В качестве рабочей жидкости использовался воздух. В опытах поддерживались граничные условия второго рода с однородной плотностью теплового потока. Потребляемая мощность рассчитывалась по разности напряжений на участке нагрева и силе тока, определяемой по падению напряжения на образцовой катушке сопротивления ($R = 0,001$ Ом).

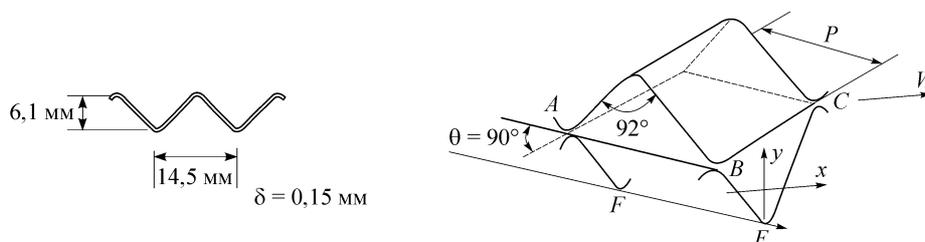


Рис. 2. Геометрические размеры сечения треугольного канала и схема ячейки.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОТОКЕ

Измерения температуры в потоке проводилось специально изготовленным термопарным зондом (рис. 3). Конструкция зонда была выбрана таким образом, чтобы он как можно меньше влиял на распределение температуры в пристенной области потока. Зонд состоял из L-образной нержавеющей трубки диаметром 2,5 мм, на конце горизонтального участка которой закреплялся тонкий капилляр диаметром 0,3 мм и длиной около 12 мм. В капилляре были протянуты нихром-константановые электроды диаметром 0,03 мм. Горячий спай термопары располагался на расстоянии около 1,5 мм от конца капилляра. После механической обработки спаю его поперечный размер не превышал 10 мкм. При измерениях зонд устанавливался так, чтобы капилляр был параллелен боковым стенкам канала нагреваемой волнистой пластины. Зонд крепился к координатному устройству с микрометрическим винтом. Холодный спай термопары располагался в канале перед участком нагрева и омывался потоком рабочей жидкости.

Для перемещения термопары в потоке изготовлен специальный механизм ввода зонда в канал, траверсное устройство которого позволяет перемещать термопару в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Перемещение зонда вдоль биссектрисы угла осуществлялось микрометрическим винтом и фиксировалось индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Перемещение зонда вдоль основного потока позволяет получить распределение температуры в различных сечениях рабочего канала на определенных расстояниях от вершины угла.

Сигнал с термопары, величина которого не превышала нескольких милливольт, поступал на усилитель постоянного тока с полосой пропускания 10 кГц и уровнем шумов, приведенных ко входу, не более 10 мкВ. В данной серии опытов измерения температуры в потоке проводились в ячейке, расположенной в середине канала в 4 см от выхода, несколько ниже по потоку от места расположения термопар на стенке [10]. Полученный таким образом температурный сигнал подавался на 12-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и поступал в ЭВМ. Для измерения термо-ЭДС использовался также цифровой вольтметр постоянного тока с ценой деления в $1 \mu V$. Схема измерений, выполняемых на контуре, также включала в себя определение параметров, необходимых для контроля режима работы контура, и величин, необходимых для расчета термогидравлических характеристик рабочего участка при заданных условиях опыта. Такими параметрами являлись давление и температура в различных местах контура, расход теплоносителя, мощности, подводимые к рабочему участку, и т. д. Общий расход воздуха через рабочий участок измерялся расходомером и регулировался вентилем. Температура на входе в участок поддерживалась постоянной с помощью устройства термостабилизации. Перепад давления на рабочем участке определялся по показаниям дифференциальных датчиков давления, подключенных к дренажным отверстиям на его входе и выходе.

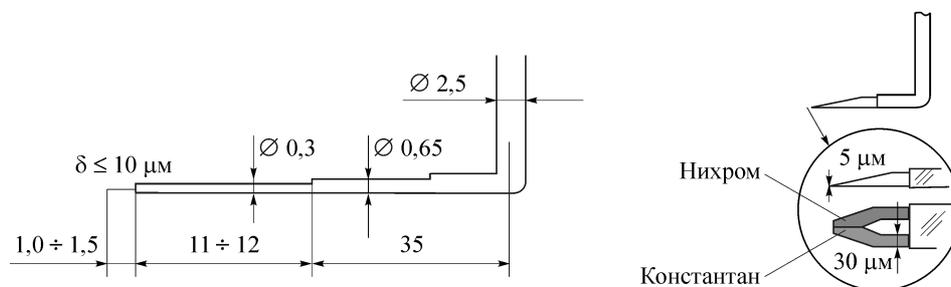


Рис. 3. Схема микротермопарного зонда.

Термопары обеспечивали измерение всех температур с точностью до $\pm 0,1$ °С. Напряжение и ток на нагревателе измерялись с точностью $\pm 0,05$ %. Перепад температуры между стенкой в измеряемом сечении и воздухом на входе в рабочий канал в данных опытах составлял 10–25 К. Расход воздуха измерялся с помощью ротационного счетчика газа. Ошибка в определении расхода достигала ± 5 %, что вносило основную погрешность в определении значений критерия Re.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные осциллограммы температурного сигнала в потоке при различных числах Рейнольдса приведены на рис. 4. Анализ этих данных показывает, что заметные температурные пульсации в потоке появляются при числе $Re \sim 400$. Таким образом, переход от ламинарного режима течения к турбулентному между волнистыми пластинами начинается при числах Re более 400. Следует особо отметить, что при формировании развитого турбулентного потока отсутствует перемежающийся характер течения с характерными турбулентными пробками.

На рис. 5 представлены распределения осредненной температуры в потоке вдоль биссектрисы угла, образующего гофр, при различных числах Рейнольдса. Измерения проведены до значений $Y = 5,5$ мм (Y — расстояние от вершины угла). Это ограничение связано с конструкцией рабочего канала и термопарного зонда. Температура представлена в безразмерном виде $(T - T_0)/(T_w - T_0)$, где T_w — температура стенки, полученная путем экстраполяции линейного участка профиля температуры на стенку, а T_0 — минимальная температура во внешней области потока. При ламинарном режиме течения ($Re = 380$), когда температурные пульсации в потоке отсутствуют, температура линейно изменяется с увеличением расстояния от стенки без каких-либо особенностей. Основное падение температуры происходит в слое толщиной около 3 мм. Далее с увеличением расстояния от вершины угла температура практически не меняется, при этом следует отметить небольшое ее повышение при приближении к границе пластин. Такое увеличение температуры

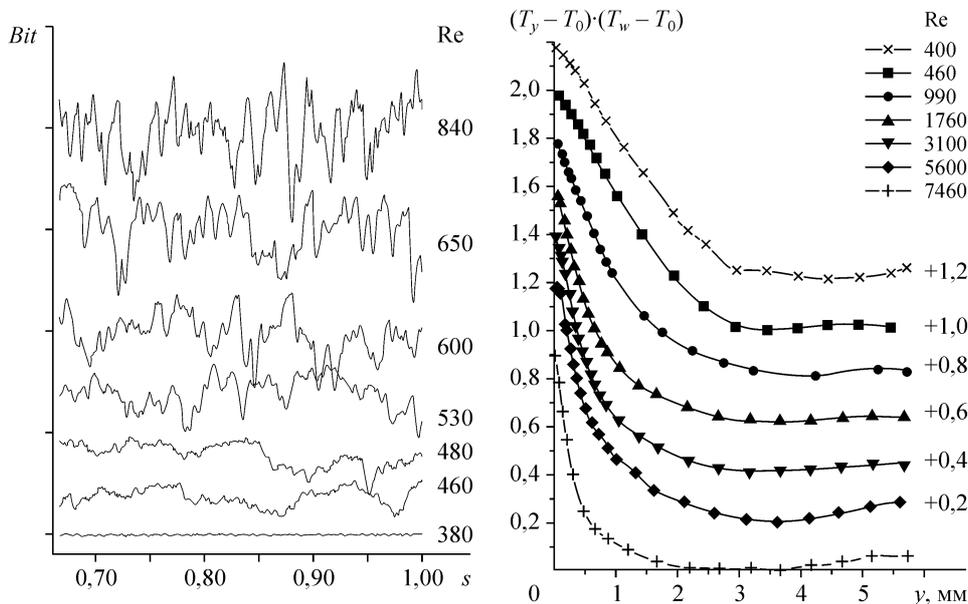


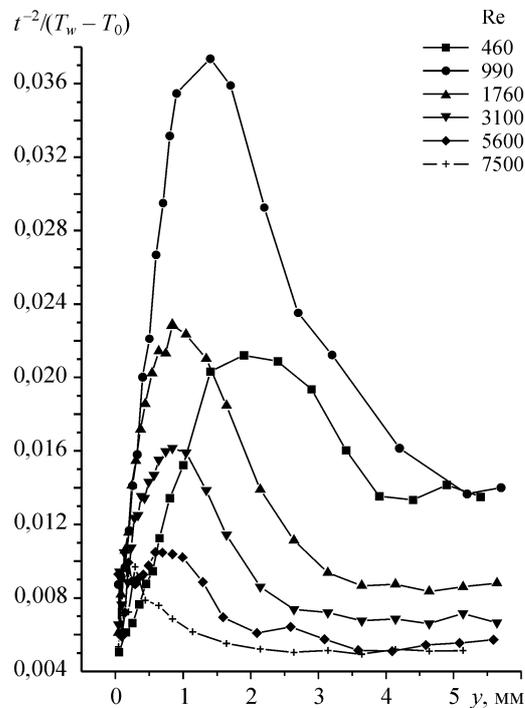
Рис. 4. Характерные осциллограммы температурного сигнала в потоке при различных числах Рейнольдса.

Рис. 5. Распределения осредненной температуры в потоке вдоль биссектрисы угла при различных числах Рейнольдса.

наблюдается и при турбулентном режиме течения. Этот рост, по-видимому, связан со сносом нагретого воздуха вниз по потоку течением в верхней пластине. С ростом числа Re и появлением температурных пульсаций протяженность линейного участка быстро уменьшается и при $Re \geq 2000$ составляет доли миллиметра. Таким образом, можно говорить, что основное термическое сопротивление, как и в случае развитого турбулентного потока в прямолинейных каналах, сосредоточено в узкой пристенной области толщиной в несколько сот микрон (зоны вязкого подслоя и промежуточный слой).

Как уже отмечалось, температурные пульсации в потоке появляются при числе $Re > 400$. Данные по распределению интенсивности пульсаций температуры в потоке, отнесенные к полному температурному напору, представлены на рис. 6. На начальной стадии развития турбулентности относительная интенсивность турбулентных пульсаций растет. Максимум температурных пульсаций наблюдается на внешней границе линейного участка профиля температуры. С ростом числа Re протяженность линейного участка быстро уменьшается, и область максимального значения температурных пульсаций смещается к стенке. Относительная интенсивность температурных пульсаций быстро снижается. При числах Re более 1760 течение в упаковке становится хаотичным, по своим параметрам оно близко к турбулентному. Турбулентность генерируется в пристенной области, где порождается высокий уровень температурных пульсаций у стенки. В то же время интенсивное турбулентное перемешивание приводит к быстрому снижению уровня температурных пульсаций в ядре потока. Основное термическое сопротивление сосредоточено в пристенном слое толщиной менее 1 мм, а толщина теплового подслоя составляет несколько сотен микрон. Измерения температуры вдоль координаты X проведены при числах Рейнольдса от 1500 до 3500. На рис. 7 представлены распределения осредненной температуры и интенсивности температурных пульсаций вдоль координаты X при числе Рейнольдса 3500. Ось X направлена параллельно боковым стенкам рабочего участка вниз по потоку. Значения координаты X отсчитываются от подветренной стенки канала. Пунктиром на графиках отмечены координаты наветренной стороны канала. Измерения проведены на различных расстояниях от вершины угла (координата Y) в сечении, расположенном на расстоянии около 35 мм от боковой стенки. Как видно из полученных данных, имеется большое различие в распределении осредненной температуры и интенсивности температурных пульсаций в областях подветренной и наветренной сторонах канала. Возле подветренной стороны канала, где образуются застойные зоны и интенсивность теплоотдачи низкая, толщина температурного пограничного слоя значительно больше, чем на наветренной

Рис. 6. Распределения интенсивности пульсаций температуры в потоке вдоль биссектрисы угла при различных числах Рейнольдса.



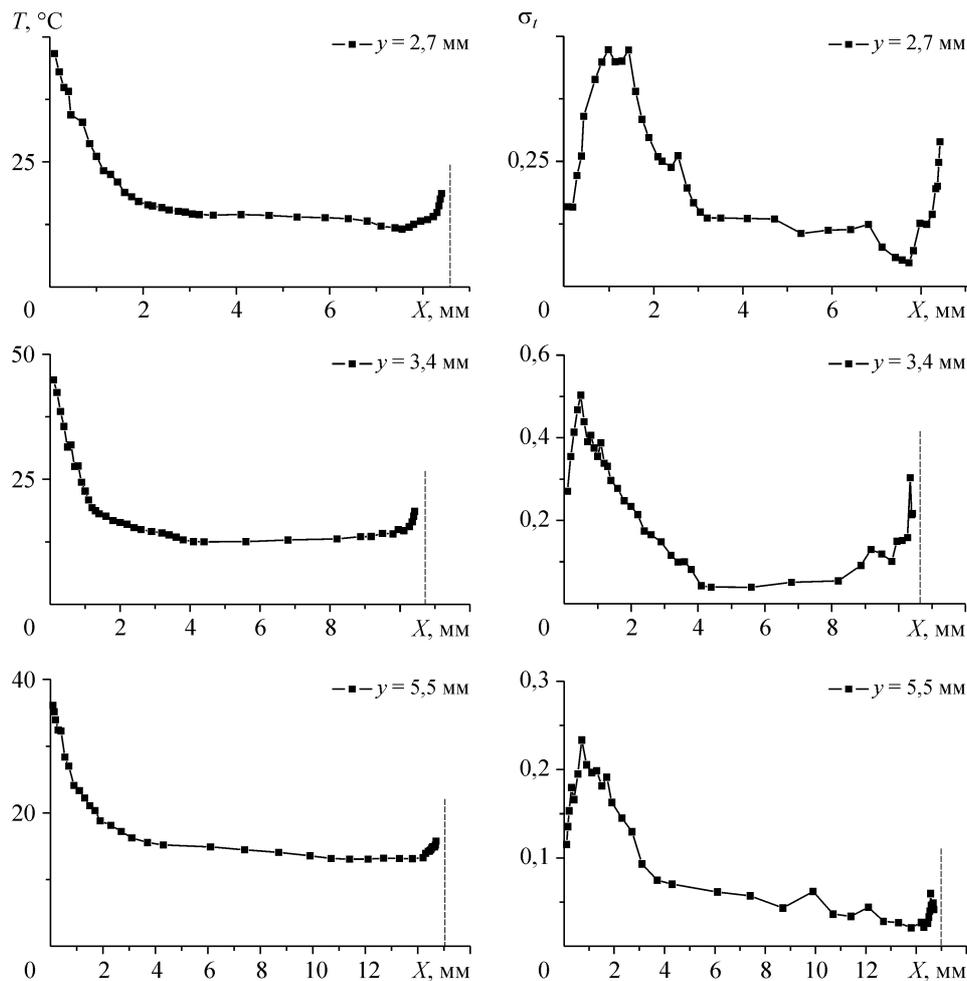


Рис. 7. Распределение температуры и интенсивности температурных пульсаций вдоль направления основного потока от подветренной до наветренной стороны канала ($Re = 3500$).

стороне. В этой области наблюдается высокий уровень температуры и температурных пульсаций на расстояниях 1–2 мм от стенки. Такое распределение температурных пульсаций, по-видимому, связано с возникновением зоны отрыва потока в этой области. Как видно из полученных данных, в области подветренной стороны канала наблюдается довольно широкая зона с высоким уровнем температурных пульсаций. Интенсивность температурных пульсаций на подветренной стороне канала значительно выше, чем на наветренной стороне. В то же время интенсивное турбулентное перемешивание приводит к быстрому снижению уровня температурных пульсаций в ядре потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования полей температуры показали, что переход от ламинарного режима течения к турбулентному между волнистыми пластинами начинается при числах Re около 400. При формировании развитого турбулентного потока не наблюдается перемежающийся характер течения с характерными турбулентными пробками. При турбулентном режиме течения основное изменение температуры происходит в узкой пристенной области толщиной в несколько сот микрон. Максимальный уровень температурных пульсаций

наблюдается на внешней границе линейного участка температурного профиля. Имеет место существенное различие в распределении температуры в потоке на наветренной и подветренной сторонах канала.

Для моделирования процессов переноса тепла в волнистых каналах необходимо детально исследовать структуру турбулентного потока, при этом особое внимание должно быть уделено изучению характера течения на наветренной и подветренной сторонах канала и в зонах турбулентного отрыва. Турбулентный поток между двумя волнистыми пластинами имеет зоны отрыва, которые существенно влияют на процессы тепло- и массопереноса. Таким образом, можно говорить об аналогии процессов теплообмена в потоке между волнистыми пластинами и такими объектами, как зернистый слой и упаковки тел различной формы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

D_h — гидравлический диаметр канала, м,	W — скорость, м/с,
q — тепловой поток, Вт/м ² ,	X — продольная координата вдоль основного потока, мм,
$Re = WD_h/\nu$ — число Рейнольдса, безразмерное,	Y — поперечная координата, мм,
s — время, с,	ν — коэффициент кинематической вязкости, м ² /с,
T — температура, К,	$\sigma_r = \sqrt{t^2}$ — среднеквадратичное значение пульсаций температуры, К.
t' — пульсация температуры, К,	

ИНДЕКСЫ

0 — внешняя область потока,	w — стенка канала.
-----------------------------	----------------------

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. — М.: Энергия, 1967. — 222 с.
2. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Мацушин Э.А., Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 592 с.
3. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1990. — 208 с.
4. Антонов А.Н., Баранов Ю.Ф., Ключков А.Ю. и др. Экспериментальное исследование теплопередающих поверхностей с компланарными каналами (типа Френкеля) // Вестник МЭИ. Теплоэнергетика. — 1997. — № 1. — С. 21–23.
5. Савостин А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева // Теплоэнергетика. — 1970. — № 9. — С. 75–78.
6. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / Пер. с нем. — М.: Энергоиздат, 1981. — 384 с.
7. Bravo I.E., Roha J.A., Fair J.R. Mass transfer in gauze packings // Hydrocarbon Processing. — 1985. — January. — P. 91–95.
8. Gradeck M., Lebouche M. Wall shear measurements inside corrugated channels using the electrochemical technique // Experiments in Fluids. — 1998. — Vol. 24. — P. 17–26.
9. Stasiek J., Collins M.W., Ciofalo, M., Chew, P.E. Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages-1. Experimental results // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. — 1996. — Vol. 39, No. 1. — P. 149–164.
10. Перепелица Б.В. Экспериментальное исследование локального теплообмена в упаковке с треугольными каналами // Теплофизика и аэродинамика. — 2006. — Т. 13, № 4. — С. 595–601.
11. Перепелица Б.В. Визуальное исследование структуры воздушного потока в каналах сложной формы // Тез. докл. VIII Межд. семинара. — 2001. Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. — Новосибирск. — Вып. 8. — С. 136–137.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2007 г.