

УДК 536.24

**Экспериментальное исследование влияния  
структуры турбулентного потока  
на распределение температуры  
в компактном теплообменнике**

**Б.В. Перепелица**

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

E-mail: perep@itp.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования распределения температуры на поверхности теплообменника сложной формы типа “набивки Френкеля”. Измерения выполнены при течении воздуха между двумя гофрированными пластинами с гофрами треугольного сечения, направленными под углом  $90^\circ$  друг к другу. Измерения проведены с помощью микротермопар, наклеенных на наружной поверхности нагреваемой поверхности. Анализируется влияние числа Рейнольдса, зазора между гофрированными пластинами и замены одной гофрированной пластины — гладкой на распределение температуры по поверхности теплообменника при турбулентном режиме течения воздуха. Проведенные исследования показали заметное влияние зазора и вносимых возмущений на вид распределения температуры по периметру нагреваемой ячейки.

**Ключевые слова:** турбулентность, структура потока, гофрированные пластины, температура стенки, точки контакта, зазор.

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что структура турбулентного потока решающим образом влияет на интенсивность турбулентного переноса тепла. Одними из наиболее трудных объектов для теоретического описания и экспериментального исследования являются процессы теплообмена в каналах сложной геометрии. В то же время, это одна из наиболее часто используемых систем в теплообменных устройствах различного назначения. 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. Распространенным способом интенсификации теплообмена является использование поверхностей с различной конфигурацией выштамповок и гофров. Трехмерные турбулентные течения в каналах сложной формы в последние десятилетия стали предметом многочисленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований. К настоящему времени опубликовано большое количество исследований термогидравлических характеристик сложных компактных теплообменников [1–6]. Разработка

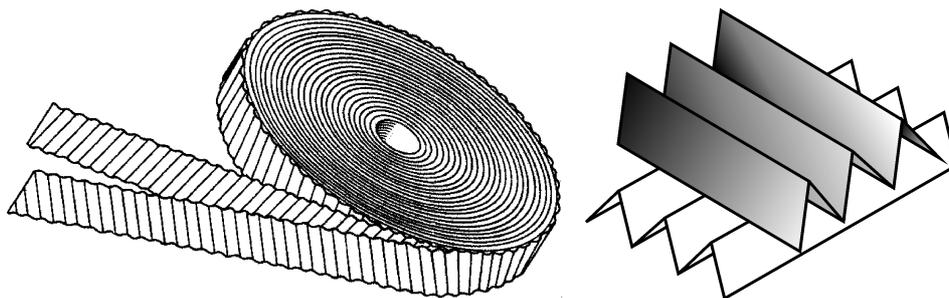


Рис. 1. Насадка низкотемпературных регенераторов из гофрированных металлических лент (набивки Френкеля) и схема каналов в ней.

соответствующих методов расчета турбулентных потоков затруднена из-за отсутствия сколько-нибудь удовлетворительной модели турбулентности для трехмерных течений. Структура турбулентности таких потоков еще недостаточно изучена. Большую информацию об общей картине течения в каналах сложной формы могут дать визуальные методы исследования [7]. Значительная интенсификация теплоотдачи наблюдается при взаимодействии скрещивающихся струек жидкости, она осуществляется в теплопередающих элементах типа “набивки Френкеля” [8–10]. Такие поверхности теплообмена (рис. 1) образованы из гофрированных пластин, на смежных листах которых 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.). В работе [11] представлены результаты экспериментального изучения обтекания турбулентным потоком плоского ребра при изменении угла ориентации к направлению течения от  $50$  до  $90^\circ$  для низкого и высокого уровней турбулентности. Проанализировано влияние угла скоса потока, высоты ребра и внешней степени турбулентности на локальные коэффициенты теплоотдачи и интенсификацию теплообмена. Пластинчато-ребристая поверхность теплообмена, элементы которой располагаются под некоторым углом к первоначальному направлению движения потока, способна обеспечить высокий уровень теплоотдачи. Более глубокое понимание процессов переноса в таких каналах может дать исследование различных ситуаций. В частности, наличие зазора между пластинами или замена одной волнистой пластины — гладкой, может дать дополнительную информацию о роли точек контакта или о влиянии закручивающего смежного потока.

#### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проведены при течении воздуха между двумя гофрированными пластинами с треугольными гофрами в диапазоне чисел Рейнольдса от  $800$  до  $19000$ . Схемы рабочего участка, одной ячейки канала и подробное описание методики проведения экспериментов представлены в работе [5]. Одна из пластин шириной  $80$  мм и длиной  $140$  мм изготовлена из тонкой нержавеющей ленты толщиной  $0,15$  мм, другая, длиной  $200$  мм — из органического стекла. Металлическая пластина наклеена на стеклотекстолитовый шаблон такой же формы. Лента нагревается электрическим током и омывается с одной стороны потоком рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости использовался воздух. В опытах поддерживались граничные условия второго рода с однородной плотностью теплового потока. Профиль пластин и расположение термодпар на ней представлены на рис. 2. Анализируется влияние числа Рейнольдса, зазора между гофрированными пластинами,

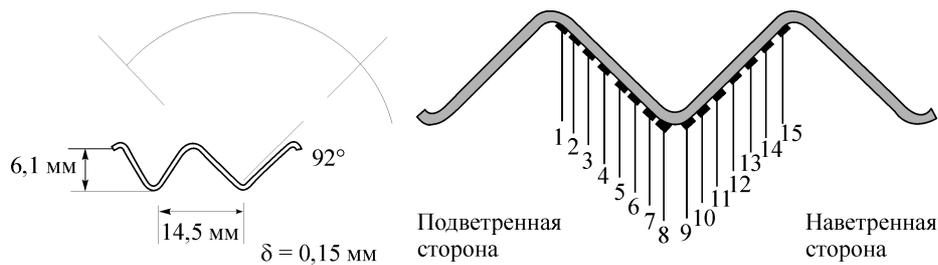


Рис. 2. Геометрические размеры сечения треугольного канала и схема расположения 15 термопар поперек ребра участка нагрева.

замены одной гофрированной пластины — гладкой, на распределение температуры по поверхности теплообменника при турбулентном режиме течения воздуха. Величина зазора между пластинами изменялась от 1 до 2,7 мм. Для измерения температуры поверхности нагрева использовались термопары. Термопары изготовлены из проводников диаметром 0,06 мм. Горячие спаи термопар размером 0,01×0,25×1 мм наклеивались на тепловыделяющую стенку, на которую предварительно наклеивался слой слюды толщиной около 0,005 мм. Термопары на стенке располагались по линии, перпендикулярной ребрам волнистой пластины, вдоль оси Z. На ребрах канала размещалось 15 термопар: на наветренной стороне — семь термопар, на подветренной — восемь. Холодные спаи термопар располагались в канале перед участком нагрева и омывались потоком рабочей жидкости, что позволяло измерять температуру стенки относительно температуры набегающего потока. Для измерения термо-ЭДС использовался 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, мощность, подводимая к рабочему участку, и т. д. Температура на входе в рабочий участок поддерживалась постоянной с помощью устройства термостабилизации. Термопары обеспечивали измерение всех температур с точностью до  $\pm 0,1$  °C. 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 8–25 К. Расход воздуха измерялся с помощью ротационного счетчика газа. Ошибка в определении расхода достигала  $\pm 5$  %, что вносило основную погрешность в нахождении значения числа Re.

Как уже отмечалось, изменение структуры потока над нагреваемой пластиной осуществлялось следующими способами: созданием зазора между гофрированными пластинами и заменой одной гофрированной пластины гладкой пластиной (рис. 3). При наличии зазора между гофрированными пластинами точки контакта исчезают, взаимодействие между потоками в каналах уменьшается, что приводит к снижению интенсивности турбулентности потока в рабочем канале. Еще более сильное снижение уровня турбулентности потока в упаковке происходит при наличии зазора и замене одной гофрированной пластины — гладкой. В обоих случаях над нагреваемой пластиной создается турбулентный поток, направленный



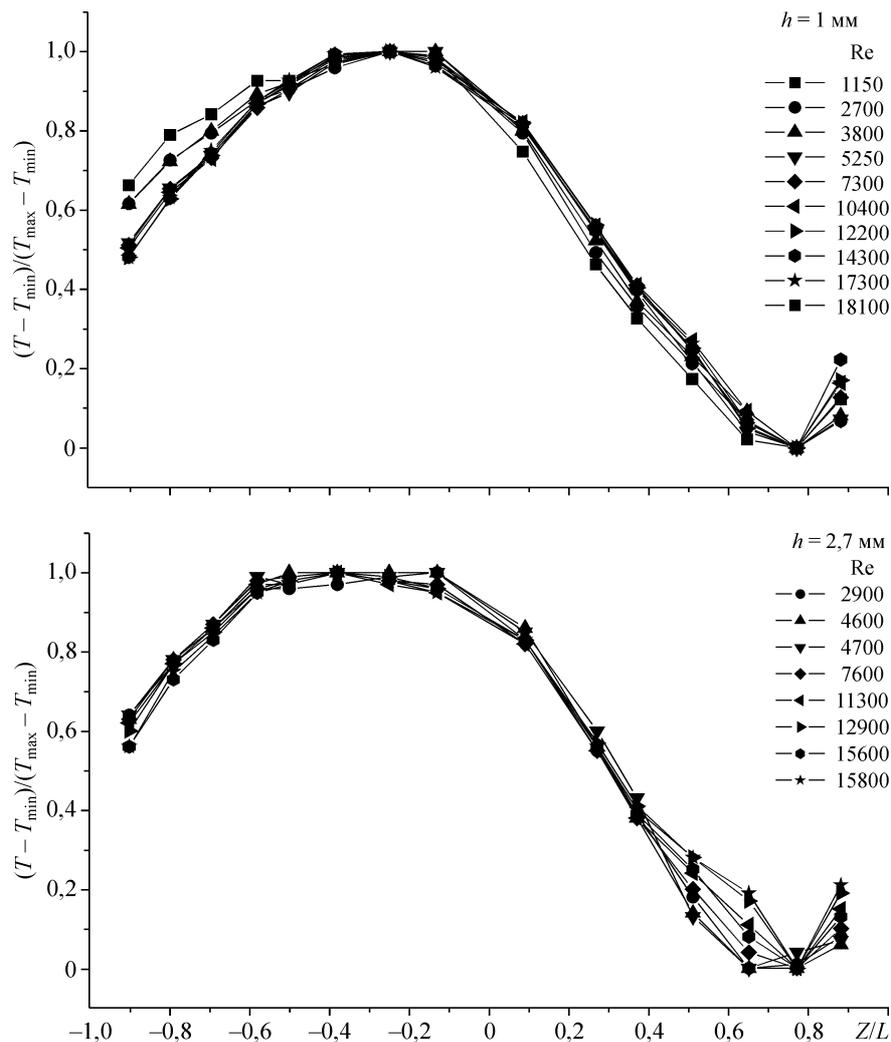


Рис. 5. Распределения температуры поперек ребра ячейки в зависимости от числа  $Re$  при зазоре между гофрированными пластинами в 1 и 2,7 мм.

В случае замены одной гофрированной пластины — гладкой, характерные особенности в распределении температуры по периметру волнистого канала сохраняются. Влияние числа  $Re$  на распределение температуры в верхней части подветренной стороны гофрированного канала исчезает. Существенная зависимость температуры от числа Рейнольдса в этом случае наблюдается в глубине канала. С ростом числа  $Re$  интенсивность теплоотдачи в вершине угла повышается, что, по-видимому, связано с образованием второго вихря в этой области. С увеличением скорости потока интенсивность этого вихря возрастает, и температура стенки в этой зоне понижается.

Полученные данные говорят о том, что наиболее высокие коэффициенты теплоотдачи имеют место в верхней части наветренной стороны ребра, а наиболее низкие — на подветренной стороне ребра, где температура достигает своих максимальных значений. Распределение температуры по периметру канала связано

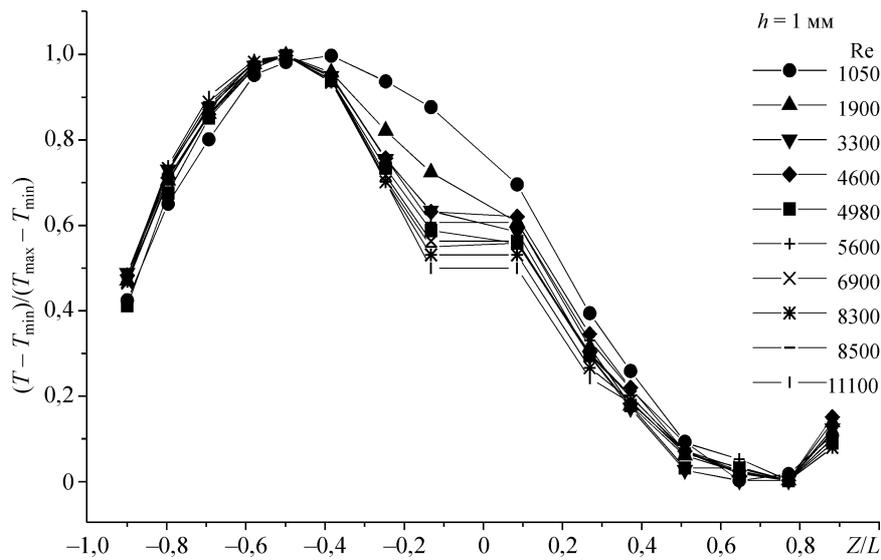


Рис. 6. Распределения температуры поперек ребра ячейки в зависимости от числа Re при одной гладкой пластине и зазоре в 1 мм.

со структурой турбулентного потока, с тем, что в верхней части подветренной стороны ребра происходит срыв потока с его дальнейшим присоединением вблизи верхней части наветренной стороны ребра. Такое поведение потока подтверждают и визуальные наблюдения.

Для моделирования процессов переноса тепла в волнистых каналах необходимо иметь ясную картину течения и исследовать локальную структуру турбулентного потока. При этом особое внимание должно быть уделено изучению зон турбулентного отрыва.

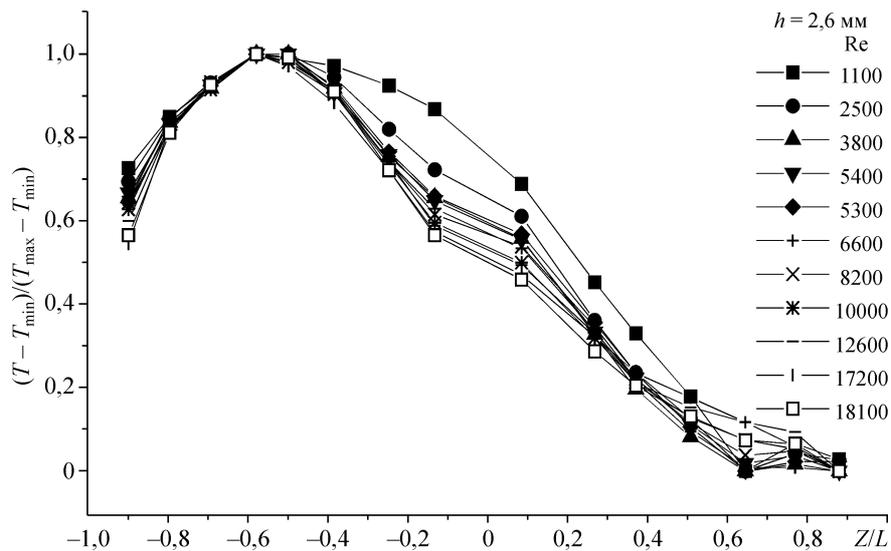


Рис. 7. Распределения температуры поперек ребра ячейки в зависимости от числа Re при одной гладкой пластине и зазоре в 2,6 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При контакте пластин наиболее заметное влияние числа  $Re$  на распределение температуры наблюдается в верхней части подветренной стороны гофрированного канала. С ростом величины зазора между пластинами эта зависимость исчезает и интенсивность теплоотдачи в этой области падает. Такие изменения можно объяснить отсутствием влияния точек контакта на турбулизацию потока на подветренной стороне канала.

В случае замены одной гофрированной пластины — гладкой, характерные особенности в распределении температуры по периметру волнистого канала сохраняются. Наиболее высокая температура наблюдается на подветренной стороне канала, наиболее низкая — в верхней части наветренной стороны канала. Наибольшая зависимость температуры от числа  $Re$  в этом случае наблюдается в глубине канала. С ростом числа  $Re$  интенсивность теплоотдачи в вершине угла повышается, что, по-видимому, связано с образованием второго вихря в этой области. С увеличением скорости потока интенсивность этого вихря возрастает, что приводит к повышению интенсивности теплоотдачи в этой зоне.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Re = \frac{WD_h}{\nu}$ — число Рейнольдса, безразмерное,	$\nu$ — коэффициент кинематической вязкости, $m^2/s$ ,
$D_h$ — гидравлический диаметр канала, м,	$T$ — температура, К,
$L$ — периметр ребра, м,	$W$ — скорость, м/с,
	$h$ — величина зазора, мм,
	$z$ — поперечная координата, мм.

## ИНДЕКСЫ

min — минимальное значение,	o — значение на входе,
max — максимальное значение,	w — параметры на стенке канала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин 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.
2. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. — М.: Атомиздат, 1974. — 407 с.
3. Дрейцер Г.А., Калинин Э.К., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1990. — 207 с.
4. Дрейцер Г. А., Исаев С. А., Лобанов И. Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43, № 2. — С. 223–230.
5. Перепелица Б.В. Экспериментальное исследование локального теплообмена в упаковке с треугольными каналами // Теплофизика и аэромеханика. — 2006. — Т. 13, № 4. — С. 549–555.
6. Перепелица Б.В. Исследование поля температуры в турбулентном потоке при течении воздуха в каналах структурной упаковки // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 4. — С. 555–561.
7. Перепелица Б.В. Визуальное исследование структуры воздушного потока в каналах сложной формы // Тез. докл. VIII Межд. семинара. Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. — Новосибирск, 2001. — Вып. 8. — С. 136–137.
8. Савостин А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева // Теплоэнергетика. — 1970. — № 9. — С. 75–78.
9. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. — М.: Энергоиздат, 1981. — 384 с.
10. Gradeck M., Lebouche M. Wall shear measurements inside corrugated channels using the electrochemical technique // Experiments in Fluids. — 1998. — Vol. 24, No. 1. — P. 17–26.
11. Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Смутьский Я.И. Особенности теплообмена в отрывном течении за плоским ребром, расположенным под углом к основному потоку, при изменении внешней турбулентности // Теплофизика и аэромеханика. — 2008. — Т. 15, № 2. — С. 249–257.

*Статья поступила в редакцию 7 июля 2008 г.*