

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование распределения температуры в потоке воздуха и на поверхности теплообменника сложной формы. Измерения выполнены при течении воздуха между двумя гофрированными пластинами с гофрами треугольного сечения и направленными под углом 90° друг к другу. Измерения температуры стенки проведены с помощью микротермопар наклеенных на наружной поверхности нагревателя, а в потоке – специально изготовленным термопарным зондом. Горячий спай термопары не превышал 10 мкм . Анализируется влияние точек контакта и числа Рейнольдса на распределение температуры при турбулентном режиме течения. Проведенные исследования показали незначительное влияние точек контакта на вид распределения температуры по периметру ячейки.

1. 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 [1–4]. 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. Структура турбулентности таких потоков еще недостаточно изучена. Значительная интенсификация теплоотдачи наблюдается при взаимодействии скрещивающихся струек жидкости, осуществляемая в теплопередающих элементах [4–8]. Такого рода поверхности теплообмена могут быть образованы из гофрированных пластин, на смежных листах которых гофры расположены под некоторым углом друг к другу. Такие теплопередающие элементы находят широкое применение в различных областях техники благодаря ряду особенностей (технологичность конструкции, высокая компактность набивки и др.). Пластинчато-ребристая поверхность теплообмена, элементы которой располагаются под некоторым углом к основному направлению движения потока способна обеспечить высокий уровень теплоотдачи. Большую информацию об общей картине тече-

ния в каналах сложной формы могут дать визуальные методы исследования [9].

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проведены при течении воздуха между двумя волнистыми пластинами треугольного сечения, элементы которых располагаются под углом в 45 градусов к основному направлению движения потока. Исследования проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от 400 до $19\,000$. Схема одной ячейки канала представлена на рис. 1. Одна из пластин шириной 80 мм и длиной 140 мм изготовлена из тонкой нержавеющей ленты толщиной $0,15 \text{ мм}$, другая, длиной 200 мм из органического стекла.

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

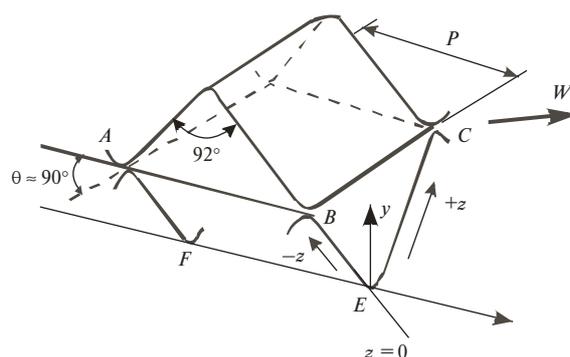


Рис. 1. Схема одной ячейки канала

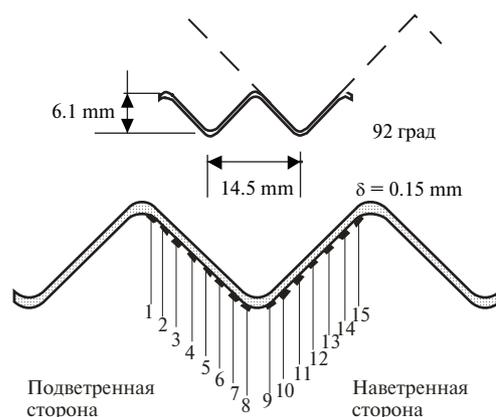


Рис. 2. Геометрические размеры сечения треугольного канала и схема расположения 15 термопар поперек ребра участка нагрева

Лента нагревается электрическим током и омывается с одной стороны потоком рабочей жидкости. Для измерения температуры поверхности нагрева и

в потоке рабочей жидкости использовался термопарный метод. Для измерения температуры поверхности нагрева горячий спай термопар расплющивался до размеров 0,01X0,25X1 мм и наклеивался на тепловыделяющую стенку с наружной стороны, на которую предварительно был наклеен слой слюды толщиной не более 0,01 мм. Измерения температуры в потоке проводилось термопарным зондом с нихром- константановыми электродами диаметром 0,03 мм. После обработки горячего спаи его поперечный размер не превышал 10 мкм.

Холодные спаи термопар располагались в канале перед участком нагрева и омывались потоком рабочей жидкости. Перемещение верхней пластины из оргстекла относительно нагреваемой позволяет изменять положение термопар относительно точек контакта. Такая процедура значительно расширяет объём получаемой информации о температуре в различных местах ячейки.

Схема измерений, выполняемых на контуре, также включала в себя определение параметров, необходимых для контроля режима работы контура, и величин, необходимых для расчета термодинамических характеристик рабочего участка при заданных условиях опыта. Термопары обеспечивали измерение всех температур с точностью до $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Напряжение и ток на нагревателе измерялись с точностью $\pm 0,05\%$.

Расход воздуха измерялся с помощью ротационного счётчика газа. Ошибка в определении расхода достигала $\pm 5\%$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены результаты измерений температуры стенки поперек ребра при различных числах Рейнольдса. Положение верхней волнистой пластины относительно поверхности нагрева в этих измерениях не изменялось. Термопары расположены в средней части ячейки. Из приведенных графиков видно, что все кривые в данных координатах при различных числах Рейнольдса мало отличаются друг от друга. Наиболее заметные расхождения в распределении температуры наблюдаются на подветренной стороне канала, что, по-видимому, связано с образованием вторичных токов и зон отрыва на этой стороне ребра. Такое распределение температуры говорит 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.

Измерения распределения температуры поперек ребра одной ячейки в зависимости от положения точек контакта при различных числах Рейнольдса показывают, что изменение температуры, как на наветренной, так и подветренной сторонах ячейки, вдоль ребра незначительно. При приближении к точке контакта в верхней части ребра температура стенки незначительно снижается. Наиболее высокие значения температуры наблюдаются на подветрен-

ной стороне ребра вблизи вершины угла, наиболее низкие – на противоположной, наветренной, стороне ребра в верхней его части. Как видно из полученных данных изменения температуры стенки, вызванные смещением относительно точек контакта, значительно меньше, чем изменения температуры по периметру ребра, связанные со структурой турбулентного потока между пластинами. Таким образом результаты измерений показывают, что процессы теплоотдачи на наветренной стороне ребра протекают более интенсивно, чем на подветренной стороне ребра.

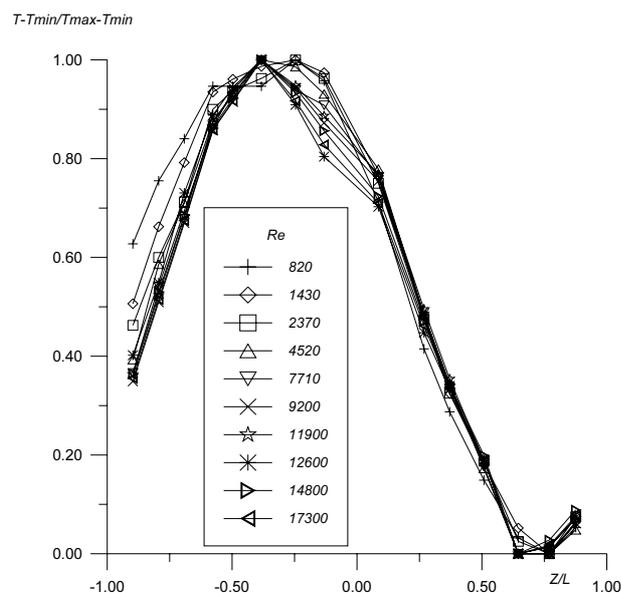


Рис. 3. Распределение температуры поперек ребра ячейки в зависимости от числа Re

На рис. 4 представлены распределения осредненных температур вдоль биссектрисы угла при различных числах Рейнольдса. 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 ($Re = 400$), 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 3мм. 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 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 $Re = 2000$ составляет доли миллиметра. Таким образом, можно говорить, что основное термическое сопротивление,

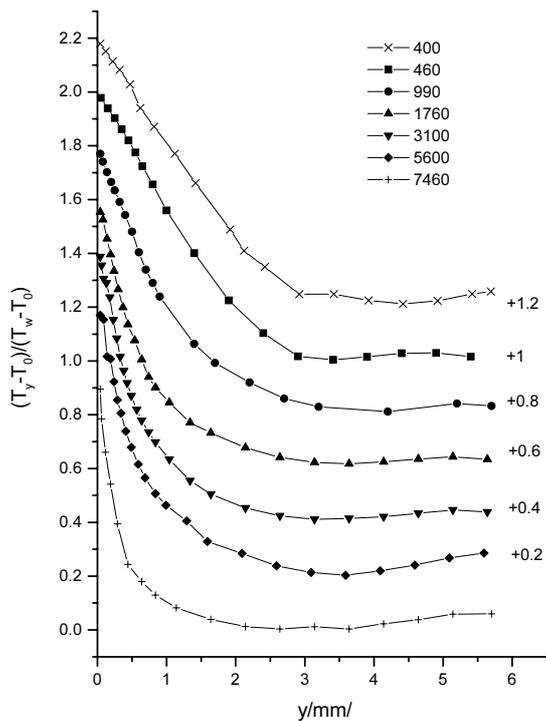


Рис. 4. Распределение осредненной температуры в потоке вдоль биссектрисы угла при различных числах Рейнольдса

как и в случае развитого турбулентного потока в прямолинейных каналах, сосредоточено в узкой пристенной области. Температурные пульсации в потоке появляются при числе $Re \sim 460$. Данные по распределению интенсивности пульсаций температуры в потоке отнесенные к полному температурному напору представлены на рис. 5. На начальной стадии турбулизации потока максимум температурных пульсаций наблюдается на внешней границе линейного участка профиля температуры.

С ростом числа Re , как уже отмечалось, протяженность линейного участка быстро уменьшается и область максимального значения температурных пульсаций смещается к стенке. Дальнейшее увеличение скорости потока приводит к его турбулизации. Турбулентность генерируется в пристенной области, где порождается высокий уровень температурных пульсаций у стенки. В тоже время, интенсивное турбулентное перемешивание приводит к быстрому снижению уровня температурных пульсаций в ядре потока. При числах Рейнольдса около 2000 в пристенной ячейке формируется развитый турбулентный поток со всеми характерными его особенностями. Основное термическое сопротивление сосредоточено в пристенном слое толщиной менее 1 мм, а толщина теплового подслоя составляет несколько сотен микрон. Максимальный уровень температурных пульсаций наблюдается на внешней границе линейного участка температурного профиля. С ростом числа Re температурный профиль перестраивается и при числах Re около 2000 принимает форму характерную для профиля температуры в развитом турбулентном потоке в прямолинейном канале.

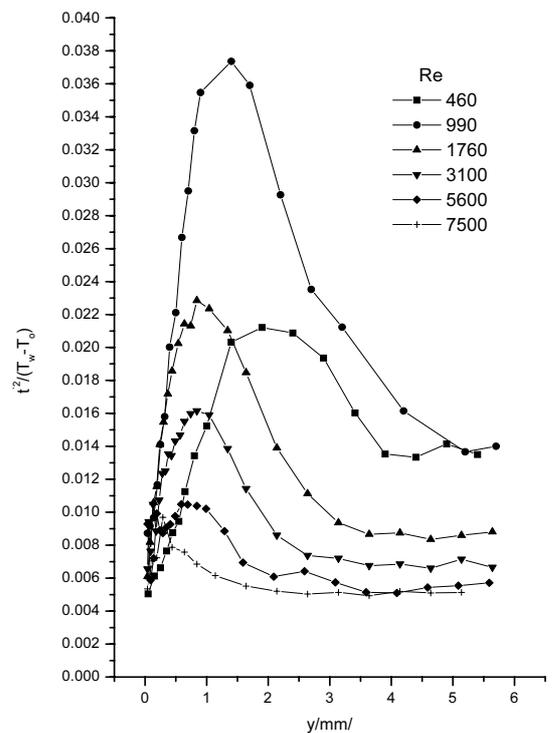


Рис. 5. Распределение интенсивности пульсаций температуры в потоке вдоль биссектрисы угла при различных числах Рейнольдса

Для оценки среднего значения числа Nu использовались результаты измерений температуры стенки полученные в середине ячейке. Для получения зависимости числа Nu от числа Рейнольдса была проведена обработка 43 режимов в диапазоне чисел Рейнольдса от 800 до 19000. Результаты расчетов в виде зависимости среднего значения числа Nu от Re в логарифмических координатах представлены на рис. 6. Здесь же приведена аппроксимация построенная по 43 экспериментальным точкам, которая имеет вид $Nu = 0,32 \cdot Re^{0,64}$. Значения показателя степени 0,6 и 0,67 характерны для теплообмена в турбулентных потоках с зонами отрыва. Величина 0,6 имеет место, например, при движении газа через пучки труб и при обтекании тел различной формы, а величина 0,67 – в области присоединения отрывного потока. Это позволяет говорить о том, что 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. Для моделирования процессов переноса тепла в волнистых каналах необходимо исследовать структуру турбулентного потока, при этом особое внимание должно быть уделено изучению зон турбулентного отрыва.

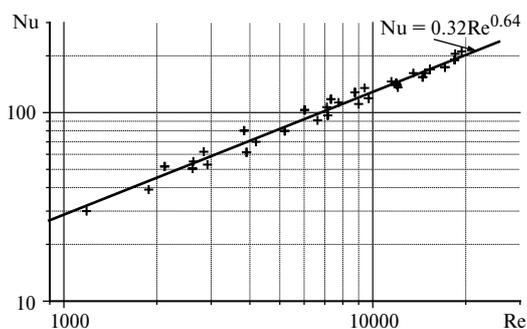


Рис. 6. Зависимость числа Nu от числа Re

4. ВЫВОДЫ

1. Кривые распределения температуры поперек ребра при турбулентном режиме течения подобны между собой при различных числах Рейнольдса.

2. Существенное изменение температуры поверхности в элементарной ячейки происходит по её глубине. Вдоль ячейки изменение температуры незначительно и составляет около 0,1 от изменения по глубине.

3. При числах Re более 2000 течение в упаковке становится хаотическим, которое по своим параметрам близко к турбулентному.

4. 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.

5. В диапазоне чисел Re от 1000 до 19000 по результатам 43 опытов для безразмерного коэффициента теплоотдачи получена зависимость $Nu = 0.32Re^{0.64}$.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a – коэффициент температуропроводности, m^2/c ;

c_p – теплоемкость, Дж/(кг·К);

D_h – гидравлический диаметр канала, м;

L – длина ребра, м;

$Nu = \frac{\alpha d_{\text{вн}}}{\lambda}$ – число Нуссельта, безразмерное;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля, безразмерное;

q – тепловой поток, $Вт/м^2$;

$Re = \frac{W D_h}{\nu}$ – число Рейнольдса, безразмерное;

T – температура, К;

W – скорость, м/с;

ΔP – перепад давления, Па;

α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

Z – поперечная координата, мм;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $м^2/с$.

Индексы:

i – номер термопары

min – минимальное значение;

max – максимальное значение;

ст – стенка канала;

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М. И.** Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 592 с.
2. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
3. **Дрейцер Г.А., Калинин Э.К., Ярхо С.А.** Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990.
4. **Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.** Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974.
5. **Савостин А.Ф., Тихонов А.М.** Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева. Теплоэнергетика. 1970. № 9. С. 75–78.
6. **Перепелица Б.В.** Экспериментальное исследование локального теплообмена при турбулентном течении воздуха в волнистом канале. CD ISBN-5-89017-027-9 // XXVII Сибирский теплофизический семинар: Сборник трудов, 1–5 октября, 2004 г. Москва–Новосибирск, 2004 (file: \Доклады в формате pdf\ 110.pdf).
7. **Bravo I.E., Roha J.A., Fair J.R.** Mass transfer in gauze packings // Hydrocarbon Processing, January. 1985. P. 91–95.
8. **Gradeck M., Lebouche M.** Wall shear measurements inside corrugated channels using the electrochemical technique // Experiments in Fluids 24. 1998. P. 17–26.
9. **Перепелица Б.В.** Визуальное исследование структуры воздушного потока в каналах сложной формы // Тезисы докладов VIII Международного семинара: Сб. Устойчивость течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. Новосибирск. 2001. Вып. 8. С. 136–137.