

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЩЕЛЕВОМ ДИСКОВОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ*

В.В. КУЗНЕЦОВ, О.В. ВИТОВСКИЙ, И.В. СИТНИКОВА

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

Экспериментально исследована гидродинамика и теплообмен при течении газа в каналах теплообменника-реактора, образованных близко расположенными теплопроводящими дисками. Реализована последовательная смена радиального течения воздуха от центра щелевого канала к его периферии и от периферии к центру в следующем канале. Измерения проведены в широком диапазоне чисел Рейнольдса для размеров щели от 0,25 до 1,5 мм.

ВВЕДЕНИЕ

Щелевые каналы и микроканальные устройства — распространенные элементы современной техники. Благодаря значительному проявлению капиллярных сил, каналы с характерным размером, меньше капиллярной постоянной, эффективно используются в тепломассообменном оборудовании при двухфазном газожидкостном течении. При однофазном течении эффективность тепло- и массообмена в мини- и микроканалах (каналах с характерным размером порядка 1 мм и менее) также высока [1–4]. Это обстоятельство в последнее время обуславливает развитие микро- и миниканальной технологии для охлаждения микроэлектронной техники, создания микрохимических реакторов с каталитическим превращением поступающей в реактор газовой смеси и т. п.

Щелевой дисковый теплообменник, в котором реализуется радиальное течение и который может быть использован в качестве каталитического реактора, является одной из разновидностей щелевого устройства. Гидродинамика двумерного течения и теплообмен при подводе или отводе тепла через цилиндрическую стенку представляет собой важную задачу для подобного типа теплообменного устройства. К этой задаче близка задача о течении между непроницаемыми дисками от источника, расположенного на их общей оси, решение которой для перепада давления получено в работе [5]. Теплообмен в щелевых каналах такой конфигурации ранее не рассматривался. Целью работы являлось экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в щелевом дисковом теплообменнике при внешнем подводе тепла.

* Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 144 и программы Президиума РАН (проект 7.4).

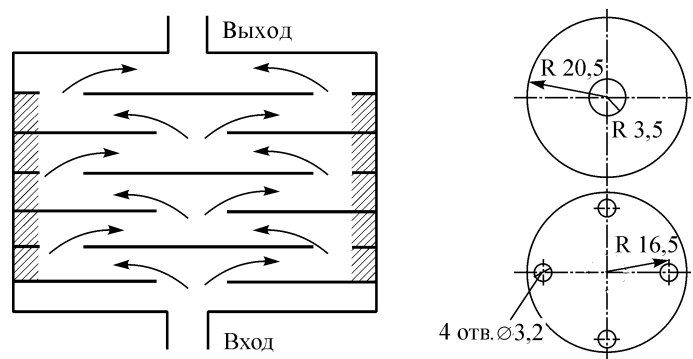


Рис. 1. Схема течения газа в дисковом щелевом теплообменнике и вид составляющих его дисков с одним центральным и четырьмя периферийными отверстиями.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Щелевой дисковый теплообменник, схема которого показана на рис. 1, представляет собой набор круглых пластин (дисков), расположенных с зазором для течения газа. При этом течение газа в каждом следующем зазоре чередуется по направлению от центра к периферии и от периферии к центру. Диаметр дисков $D = 41$ мм, диаметр центрального отверстия $d = 7$ мм, диаметр периферийных отверстий для случая четырех отверстий, расположенных под углом 90° , $d_4 = 3,2$ мм; для случая восьми отверстий, расположенных под углом 45° , $d_8 = 2,6$ мм; толщина пластины $h = 2$ мм, периферийные отверстия расположены на расстоянии 16,5 мм от центра. В зависимости от условий эксперимента в установке менялись: количество пластин (от двух до десяти), количество отверстий в пластинах, размер щелевого зазора между пластинами. Размер щелевого зазора устанавливался при помощи кольцевых прокладок с толщиной, равной 0,25, 0,5, 1 и 1,5 мм. При исследовании теплообмена пластины размещались в металлическом цилиндре. Кольцевые прокладки имели разрез и внешний диаметр несколько больше внутреннего диаметра цилиндра для обеспечения хорошего термического контакта между дисками и цилиндром.

2. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ

Проведена визуализация структуры однофазного течения с целью выявления застойных зон и определение их размеров в зависимости от размера щели между дисками и расхода газа (жидкости). Для визуализации течения была изготовлена модель щелевого реактора, состоящая из двух круглых прозрачных (оргстеклянных) пластин с различным размещением отверстий, помещенных внутрь цилиндра, выполненного из органического стекла. Зазор между пластинами изменялся в опытах. Схема проведения опытов показана на рис. 2.

В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Расход воды поддерживался с помощью вентиля и контролировался ротаметром. Для визуализации течения использовался водорастворимый краситель. Для этого в центральное отверстие нижней пластины устанавливался капилляр диаметром 0,8 мм, через который поступал краситель. Капилляр располагался вдоль цилиндрической образующей центрального отверстия, и его верхний срез находился в плоскости нижней поверхности щели для минимизации влияния на поле течения жидкости (см. рис. 2). Для визуализации различных линий тока жидкости изменялось расположение капилляра относительно одного из выходных отверстий путем перемещения его по окружности цилиндрической образующей центрального отверстия. При этом

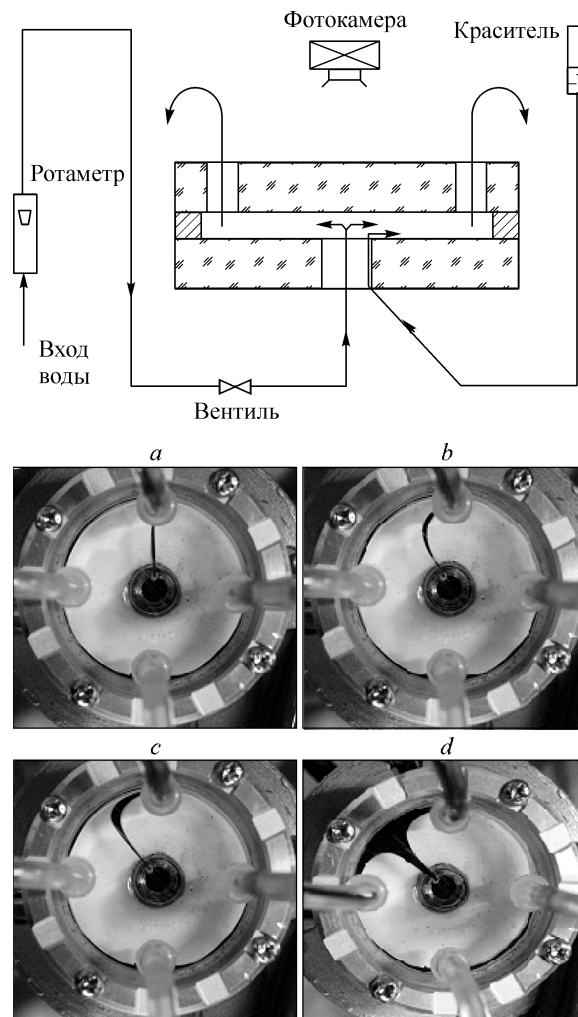


Рис. 2. Схема проведения визуализации (слева). Линии тока и форма застойной зоны в щелевом канале (справа).

$Q = 1,47$ мл/с, $h = 0,5$ мм; $\varphi = 0$ (a), 28 (b), 41 (c), 45° (d).

изменялся угол положения капилляра относительно одного из выходных периферийных отверстий от $\varphi = 0^\circ$ (при расположении капилляра на одной линии с выходным отверстием) до $\varphi = 45^\circ$ (при расположении источника краски строго между соседними выходными отверстиями). В случае $\varphi = 45^\circ$ регистрировались форма и размер застойных зон. Типичные картины линий тока и застойной зоны в дисковом щелевом канале с зазором 0,5 мм приведены на рис. 2.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Для измерения перепада давления, возникающего при течении газа между пластинами щелевого дискового теплообменника, изготовлена рабочая секция, показанная на рис. 3. Здесь же приведена схема измерения. Рабочая секция содержала десять дисковых пластин с восемью периферийными отверстиями, расположенными под углом 45° . Величина зазора варьировалась путем замены кольцевых прокладок толщиной 0,25, 0,5, 1,5 мм. Давление газа на входе и выходе рабочего участка измерялось в зависимости от его расхода, который измерялся газовым

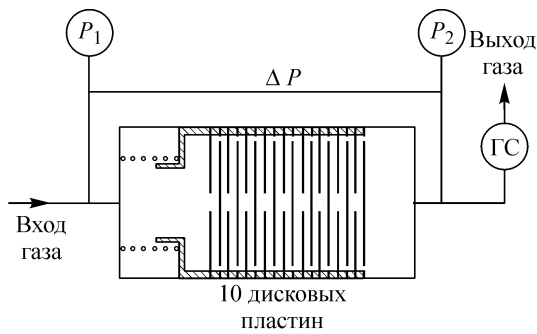
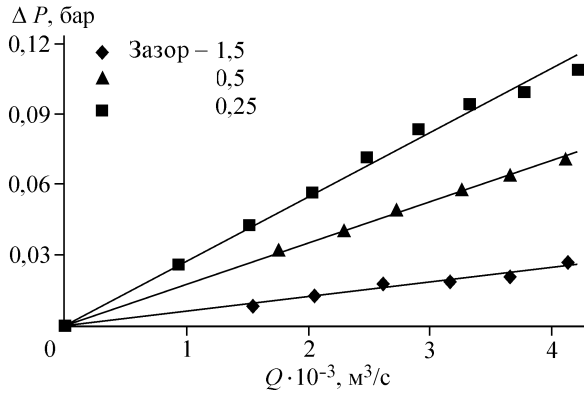


Рис. 3. Щелевой дисковый теплообменник и схема измерения перепада давления. Зависимость перепада давления в одиночном элементе теплообменника от общего расхода газа Q для теплообменников с различными зазорами между пластинами.



счетчиком, расположенным на выходе газа в атмосферу. Потери давления при расширении/сужении газа вблизи входа/выхода учитывались замерами величин зависимости перепада давления от расхода газа в рабочем участке без дисковых пластин. На рис. 3 показаны зависимости для перепада давления, приведенного к одиночному элементу теплообменника, от общего расхода газа

в щелевом теплообменнике. Перепад давления для одиночного элемента теплообменника определен как общий перепад давления dP , деленный на количество щелевых каналов. На рис. 4 приведены зависимости коэффициента сопротивления для одиночного элемента теплообменника от числа Рейнольдса. Здесь коэффициент сопротивления и число Рейнольдса определены как $\xi = 2\Delta P^*(2h)/\rho V^2 L$ и $Re = V^*(2h)/\nu$; где ΔP — перепад давления в одиночном зазоре, h — зазор между пластинами, ρ — плотность воздуха в срединном сечении между входом и выходом из зазора, V — скорость газа в данном сечении, L — длина радиального течения газа, ν — кинематическая вязкость воздуха.

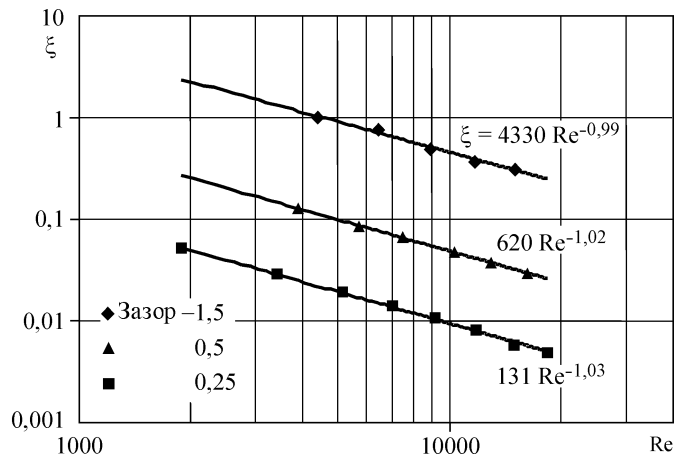


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса и зазора между пластинами для одиночного элемента теплообменника.

Точки — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация.

Из представленных данных следует, что коэффициент сопротивления для одиночного элемента дискового теплообменника пропорционален Re^{-1} . При увеличении расстояния между дисками поведение зависимости не меняется, но значения коэффициента сопротивления увеличиваются. Полный перепад давления для одиночного элемента теплообменника складывается из перепадов давлений, обусловленных вязким трением, поворотом потока и сужением/расширением линий тока. Существенное влияние с ростом толщины зазора оказывают также локальные перепады давления при струйном натекании потока из отверстия на соседнюю дисковую пластину, перепады давления в области локальных сужений и расширений потока. Кроме того, в окрестности отверстия возможно образование возвратного течения, подобно полученным решениям [5]. Таким образом, вязкое трение в пространстве щели между дисками не вносит определяющий вклад в полный перепад давления для данного теплообменника, что объясняет наблюдаемое увеличение коэффициента сопротивления при увеличении зазора между пластинами.

4. ТЕПЛОБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В ДИСКОВОМ МИКРОКАНАЛЕ

Для измерения коэффициента теплоотдачи в щелевом дисковом теплообменнике был изготовлен рабочий участок, схема которого показана на рис. 5. Он состоит из цилиндрического корпуса, в котором располагаются пять пластин толщиной 2 мм, изготовленных из теплопроводящего композита с коэффициентом теплопроводности $10 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Опыты проведены с зазором между пластинами $h = 1,5 \text{ мм}$ и $1,0 \text{ мм}$. Для измерения температуры стенки по периметру корпуса в области расположения средней пластины равномерно зачеканены четыре медь-константановые термопары. Температура воздуха на входе и на выходе рабочего участка измерялась хромель-копелевыми термопарами с изолированным спаем диаметром 1 мм. На внешней поверхности рабочего участка был намотан электрический нагреватель. Для уменьшения утечек тепла корпус теплообменника и нагреватель теплоизолированы.

Перед проведением опыта рабочий участок разогревался до температуры $\approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$, после этого на вход установки подавался воздух с меньшей температурой. Расход воздуха контролировался по U -образному манометру, расположенному на входе в рабочий участок. Объемный расход воздуха на выходе измерялся с помощью барабанного газового счетчика. В стационарном режиме, когда устанавливались все температуры, проводилось измерение температур воздуха на входе и выходе щелевой системы и температуры стенки. Коэффициент теплоотдачи

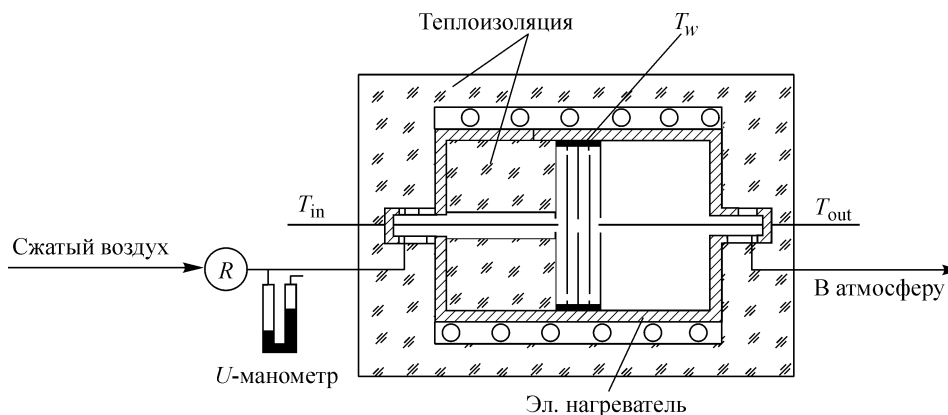


Рис. 5. Схема установки для измерения коэффициента теплоотдачи.

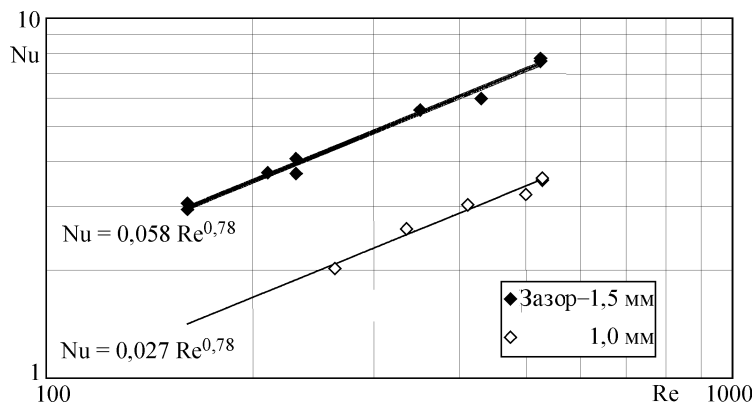


Рис. 6. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для течения газа в щелевом дисковом теплообменнике с зазором между пластинами 1,5 и 1,0 мм.

Точки — эксперимент, сплошные линии — аппроксимация.

определялся по среднелогарифмическому тепловому напору как $\alpha = Q / (S_{\text{tot}} \Delta T_m)$. Здесь Q — тепловая мощность, передаваемая от нагреваемых пластин воздуху, S_{tot} — площадь поверхности пластин, омываемая проходящим воздушным потоком, ΔT_m — среднелогарифмическая температура, определяемая как

$$\Delta T_m = (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) / \ln((T_{\text{out}} - T_w) / (T_{\text{in}} - T_w)),$$

где T_{in} — температура воздуха на входе в щелевой зазор, T_{out} — температура воздуха на выходе из щелевого зазора, T_w — среднее значение температуры на цилиндрической стенке. Здесь тепловая мощность Q определена как $Q = GC_p \Delta T$ (G — массовый расход воздуха, C_p — удельная теплоемкость воздуха, $\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$ — перепад температур воздуха на выходе и входе).

На рис. 6 приведена зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для двух размеров зазора между пластинами теплообменника. Здесь числа Рейнольдса и Нуссельта определены как $Re = V^*(2h)/\nu$, $Nu = \alpha^*(2h)/\lambda$, где V — скорость газа в срединном сечении пластин между входом и выходом из зазора, $2h = D_h$ — гидравлический диаметр, ν — кинематическая вязкость воздуха, λ — коэффициент теплопроводности. Наблюдаемое увеличение числа Нуссельта с ростом числа Рейнольдса в области чисел $Re < 1000$ характерно как для теплоотдачи в каналах малого размера [6], так и при ускоренных/замедленных течениях.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование гидродинамики и теплообмен при течении воздуха в цилиндрическом устройстве дискового щелевого теплообменника, в котором каналы образованы близко расположенными теплопроводящими дисками. При этом последовательно осуществляется смена радиального течения воздуха от центра щелевого канала к периферии и от периферии к центру. Измерения проведены в широком диапазоне чисел Рейнольдса для зазоров различного размера.

Проведена визуализация линий тока при течении жидкости в модели щелевого дискового теплообменника, когда ввод жидкости производится в центре щели, а выход — в четырех точках на периферии. Показаны направления линий тока и зоны застойного течения, что позволяет оптимизировать условия выхода для увеличения эффективной поверхности дисковых пластин.

Измерены перепады давления в дисковом теплообменнике и построены зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для различных размеров щели. Показано, что зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса в дисковом теплообменнике имеет вид $\xi \sim 1/Re$.

Измерены коэффициенты теплоотдачи в области чисел Рейнольдса от 50 до 550 и показано, что зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса имеет вид, характерный для турбулентного течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peng X.F., Wang B.X., Peterson G.P., Ma H.B. Experimental investigation of heat transfer in flat plates with rectangular microchannels // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1995. — Vol. 38, No. 1. — P. 127–137.
2. Adams M.T., Abdel-Khalik S.I., Jeter S.M., Qureshi Z.H. An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1998. — Vol. 41, No. 6-7. — P. 851–857.
3. Rostami A., Saniei N., Mujumdar A.S. Liquid flow and heat transfer in microchannels: A review // Heat and Technology. — 2000. — Vol. 18, No. 2. — P. 59–68.
4. Новиков П.А., Любин Л.Я. Гидромеханика щелевых систем. — Минск: Наука и техника, 1988. — 344 с.
5. Gagnon Y., Huang W. Fast vortex method for the simulation of flow inside channels with and without injection // J. Thermal Sci. — 1993. — Vol. 2, No. 1. — P. 1–11.
6. Bontemps A., Belghazi M. Measurements of single-phase pressure drop and heat transfer coefficient in micro and minichannels // Microscale Heat Transfer – Fundamentals and Applications in Biological and Micromechanical Systems: Proc. of NATO. — Cesme-Turkey, July 18-30. — 2004. — P. 3–4.

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2004 г.