

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА СТЕНКЕ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена задача определения распределения средних по времени коэффициентов теплоотдачи по длине в круглой трубе. Предложен метод, основанный на решении обратной задачи нестационарной теплопроводности для стенки с использованием экспериментально измеренных значений температуры стенки в некоторых точках в определенные моменты времени. Рассмотрена численная реализация решения двумерной задачи построенная по явной схеме. Проведена оценка погрешности полученных данных в зависимости от шага расположения точек измерения температуры на наружной стенке.

1. ВВЕДЕНИЕ

В каналах различных технических устройств очень часто течение рабочей среды сопровождается теплообменом между потоком и стенкой. Задача определения этого теплообмена актуальна с точки зрения обеспечения работоспособности устройства. Для некоторых течений (развитые стационарные течения в трубе, вдоль пластины и т.д.) решения существуют в виде известных эмпирических соотношений. Однако в сложных течениях (нестационарные потоки, отрывные течения, течения по каналам сложной конфигурации) даже экспериментальное измерение тепловых потоков на стенке встречает большие трудности. В данной работе предлагается использовать зависимость температурного поля тела в определенные моменты времени от граничных и начальных условий для нахождения теплового потока на стенке.

Решение обратной задачи теплопроводности находит применение в различных прикладных случаях. Этот метод предлагается использовать для определения теплофизических свойств материалов [1] или для определения граничных условий одномерного тела по измерениям температур в двух различных точках и начальным условиям [2]. Современные ЭВМ позволяют проводить численное решение обратной задачи теплопроводности применительно к различным теплофизическим задачам.

Практическая значимость решения такой задачи несомненна при исследовании отрывных течений, где плотность теплового потока на стенке существенно переменна по длине канала. В данном случае этот метод используется для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке цилиндрического канала [4].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследования влияния шага расположения точек измерения температуры на достоверность полученных значений коэффициентов теплоотдачи проводились для двух экспериментальных участков (рис. 1). Первый участок (рис. 1, а) представлял собой гладкую толстостенную трубу. Второй (рис. 1, б) – та же труба с поперечными канавками на наружной стенке.

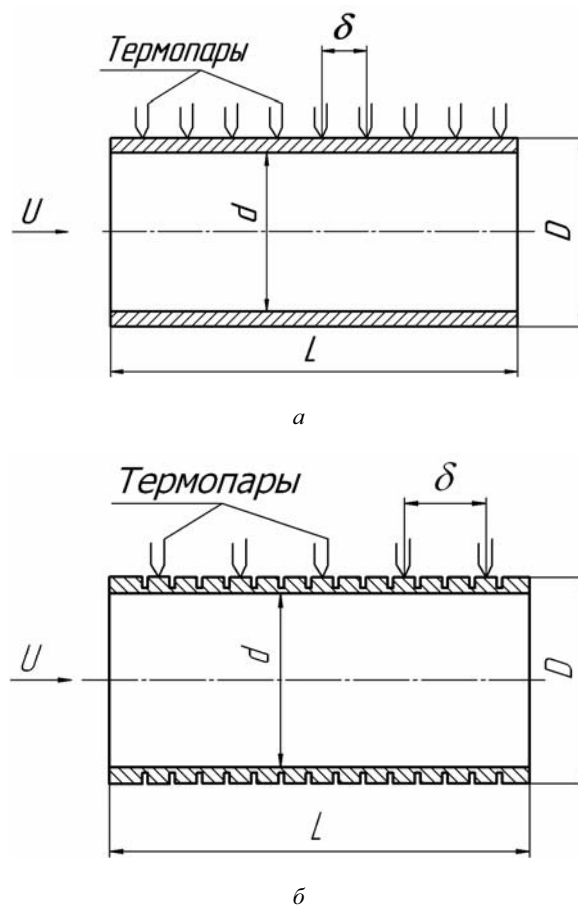


Рис. 1. Экспериментальные участки: толстостенная труба (а), труба с поперечными канавками на наружной стенке (б)

Экспериментальные участки выбирались с учетом следующих соображений. Теплообменная стенка должна быть довольно массивной, чтобы процесс изменения ее температурного поля занимал время достаточное для его достоверного измерения. Материал стенки должен иметь по возможности минимальный коэффициент температуропроводности, с целью определения локальных неоднородностей теплоотдачи на стенке, т.е. теплопередача в стенке

вследствие теплопроводности не должна слишком сильно «смазывать» картину распределения теплоотдачи между потоком и стенкой. На наружной стенке участка необходимо создать жесткие граничные условия. Экспериментальный участок должен иметь длину, достаточную для измерения локальных распределений теплоотдачи.

Таким образом, были выбраны экспериментальные участки, представляющие собой трубы с внутренним диаметром $d=64$ мм, наружным диаметром $D=76$ мм (толщина стенки 6 мм) и длиной $L=300$ мм. Материал трубы – нержавеющая сталь 12X18H10T. Первый участок (рис. 1, а) – гладкая труба.

Второй участок (рис. 1, б) имел на наружной стенке поперечные пазы шириной 2 мм и глубиной 4 мм. Пазы расположены с шагом 10 мм. Наличие таких пазов существенно уменьшает продольную теплопередачу по стенке вследствие теплопроводности и тем самым температурное поле стенки «контрастнее» отражает распределение потока тепла в стенку по продольной координате.

На внутренней поверхности трубы обеспечивался теплообмен между рабочим потоком и стенкой вследствие разности температур между ними. Снаружи труба надежно теплоизолируется, что позволяет использовать в качестве граничного условия отсутствие теплообмена на внешней границе (при условии, что теплообмен излучением пренебрежимо мал).

Определение теплового потока на внутренней стенке трубы проводится по температурам в определенных точках наружной поверхности, которые представлены как "термопары" на рис. 1. Такой выбор целесообразен с точки зрения практической реализации, т.к. достоверные измерения температуры наружной поверхности стенки существенно проще измерений на внутренней поверхности.

При одномерном распределении коэффициента теплоотдачи на стенке, т.е. в случае изменения теплоотдачи только по продольной координате, решается двумерная задача теплопроводности (по продольной и радиальной координатам). При этом берутся в расчет температуры только вдоль стенки – по образующей цилиндрической поверхности.

Проводится сравнение полученных результатов по распределению коэффициента теплоотдачи при различных шагах δ (рис. 1) расположения термопар на стенке.

3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА СТЕНКЕ

Определение распределения осредненного значения коэффициента теплоотдачи по продольной координате в цилиндрической трубе производится на основе решения уравнения теплопроводности:

$$dT/dt = a \nabla^2 T.$$

Рассматривается двумерная осесимметричная задача, т.е. температура в стенке меняется по про-

дольной координате и радиусу, а тепловой поток – по продольной координате.

Решение уравнения осуществляется при следующих краевых условиях:

$$\text{начальное условие } T(r, x, 0) = T_0 \text{ при } t = 0;$$

граничные условия

$$q = \alpha(x) \Delta T(t) \text{ на внутренней стенке;}$$

$$q = 0 \text{ на наружной стенке;}$$

$$T(t) = T_{cm}(t) \text{ показания термопар на стенке,}$$

где

$$T(r, x, t) \text{ – температурное поле стенки;}$$

$$\Delta T(t) \text{ – разность температур потока и стенки;}$$

$$r \text{ – текущий радиус;}$$

$$x \text{ – координата по длине;}$$

$$t \text{ – время;}$$

$$q \text{ – плотность теплового потока;}$$

α – коэффициент теплоотдачи между потоком и стенкой.

Численная реализация решения данной задачи строится по явной схеме [3]. Для двумерной задачи температурное поле в стенке трубы в цилиндрических координатах по времени:

$$T(r, x, t + \Delta t) = T(r, x, t) + a \Delta t ((T(r - \Delta r, x, t) (1 - \Delta r / (2r)) + T(r + \Delta r, x, t) (1 + \Delta r / (2r)) - 2T(r, x, t)) / \Delta r^2 + (T(r, x - \Delta x, t) + T(r, x + \Delta x, t) - 2T(r, x, t)) / \Delta x^2),$$

где

a – коэффициент температуропроводности материала стенки;

$$\Delta r, \Delta x, \Delta t \text{ – шаги по координатам и времени.}$$

В данной постановке неизвестной величиной является коэффициент теплоотдачи $\alpha(x)$ на границе между потоком и стенкой. Решение строится следующим образом. Задается первоначальное распределение коэффициента теплоотдачи $\alpha_0 = \text{const}$. Для этого распределения находится температурное поле в стенке. Из этого поля выбираются значения температур в точках, соответствующих координатам термопар. По этим температурам T и показаниям термопар T_{ct} вычисляется невязка $\Sigma(T - T_{ct})^2 / N$ (N – число измерений температуры). Далее распределение $\alpha(x)$ уточняется и находится следующее приближение температурного поля с последующим вычислением невязки. Решение считается найденным, когда невязка становится меньше наперед заданного малого числа.

Численное решение поставленной задачи реализовано программно на персональной ЭВМ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Целью проведенных расчетов явилось определение зависимости погрешности получаемых данных по теплоотдаче от шага расположения точек измерения температуры стенки. Таким образом, можно провести количественную оценку выбора между двумя противоречивыми требованиями: минимальная погрешность и негромоздкая система измерений.

В расчетах в качестве данных по температуре стенки брались результаты прямого расчета уравне-

ния теплопроводности. Первоначально задавалось некоторое распределение коэффициента теплоотдачи на стенке. По этому распределению рассчитывалось температурное поле в стенке. Из температур в точках, соответствующих положениям термопар, составлялся массив "экспериментальных" данных. После этого решением обратной задачи теплопроводности отыскивалось исходное распределение коэффициента теплоотдачи.

Анализ метода был проведен для следующего случая:

- время процесса – 300 сек;
- опрос температур стенки с равными интервалами за время процесса – 10 раз;
- исходная разность температур потока и стенки – 20 °С;
- теплообмен на наружной стенке и на торцевых поверхностях отсутствует;
- шаги расчетной сетки: $\Delta r=1\text{ мм}$, $\Delta x=1\text{ мм}$, $\Delta t=0,05\text{ сек}$;

шаг расположения термопар $\delta=10\dots 60\text{ мм}$;
распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке (для решения прямой задачи теплопроводности и получения массива температур наружной стенки):

$\alpha = 50\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ при $x = 0\dots 100\text{ мм}$ и $x = 200\dots 300\text{ мм}$, а на участке $l = 100\text{ мм}$ ($x = 100\dots 200\text{ мм}$) – изменяется по синусоиде (один период) $\alpha=(50\dots 110)\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ ($\alpha=110\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ при $x = 150\text{ мм}$).

При этих условиях определялись распределения коэффициентов теплоотдачи на внутренней стенке экспериментальных участков. Результаты некоторых расчетов приведены на рисунке 2.

На рис. 2, а приведены решения обратной задачи теплопроводности для гладкой трубы, на рис. 2, б – для трубы с канавками. Линией 1 показано «истинное» распределение коэффициента теплоотдачи на стенке. Точки 2, 3 и 4 – расчетные величины α , соответствующие координатам расположения термопар. Как видно, результаты расчетов удовлетворительно согласуются с исходным распределением коэффициента теплоотдачи. При этом, как и следовало ожидать, совпадение лучше в области постоянных значений α . В области сильной неравномерности (синусоида) – близость результатов исходному распределению зависит от шага расположения термопар: чем меньше шаг δ тем лучше совпадение.

Надо отметить, что задаваемый уровень невязки 10^{-4} здесь устанавливался исходя из требуемой точности расчета и принципиальной возможности достижения результата в пределах приемлемого времени расчета.

По полученным данным были определены расхождения между расчетными и истинными значениями коэффициентов теплоотдачи $\Delta\alpha$. На рис. 3 приведено характерное распределение $(\Delta\alpha)^2$ по длине канала для случая гладкой трубы при расположении термопар с шагом $\delta=30\text{ мм}$. Как видно, погрешность существенна в области высоких гради-

ентов теплового потока по продольной координате. Надо отметить, что в используемой расчетной схеме использовалась линейная интерполяция параметров в промежутках соседних точек. Применение гладких функций для этих целей, очевидно, должно привести к уменьшению погрешности метода.

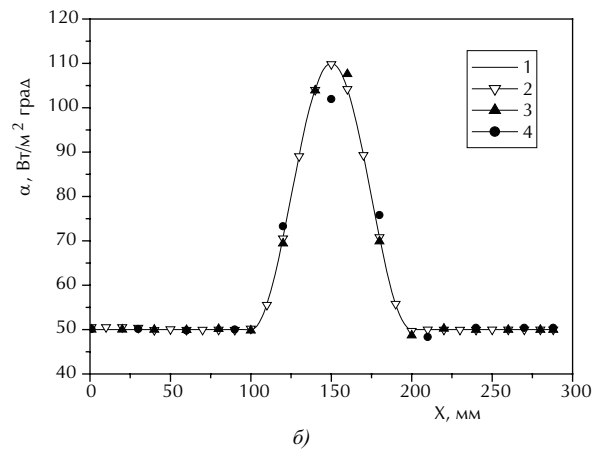
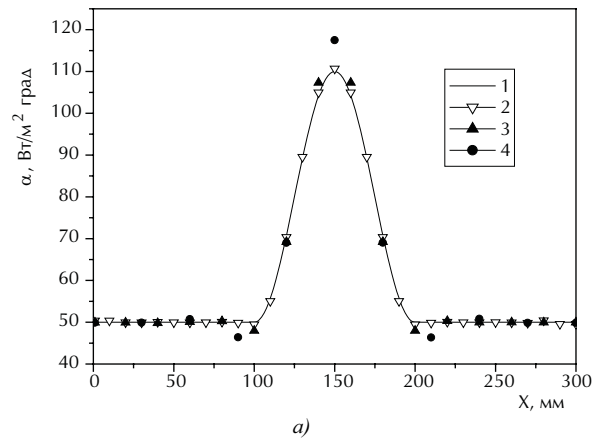


Рис. 2. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине стенки в гладкой трубе (а) и трубе с канавками (б): 1 – исходное распределение коэффициента теплоотдачи; 2 – 4 – расчетные распределение коэффициента теплоотдачи при различных шагах расположения термопар (2 – $\delta=10\text{ мм}$, 3 – $\delta=20\text{ мм}$, 4 – $\delta=30\text{ мм}$)

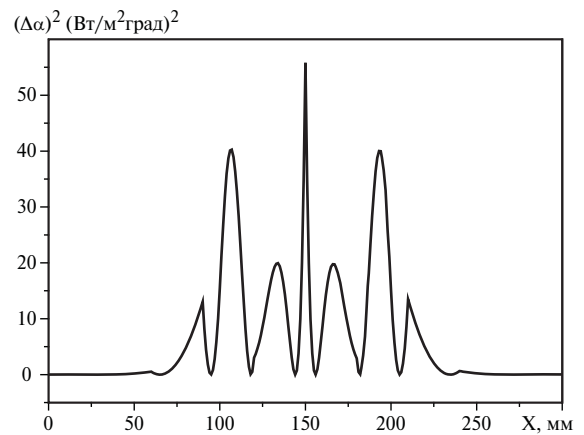


Рис. 3. Распределение отклонений коэффициента теплоотдачи по длине стенки в гладкой трубе при $\delta=30\text{ мм}$

Для всех полученных распределений коэффициента теплоотдачи были определены относительные среднеквадратичные отклонения $\sigma/\alpha_{\text{ср}}$, где средне-

квадратичное отклонение $\sigma = (\sum(\Delta\alpha)^2/N)^{1/2}$ ($N=300$ – число рассчитанных значений α). Среднее значение коэффициента теплоотдачи на участке для данных случаев $\alpha_{\text{ср}}=60$ Вт/м² град. Результаты приведены на рис. 4. Графики построены в зависимости от относительного шага расположения термопар δ/l , где $l=100$ мм – длина участка с неравномерным распределением теплового потока (синусоида). На самом деле, нахождение необходимой частоты расположения термопар наиболее актуально в особенных областях по теплообмену.

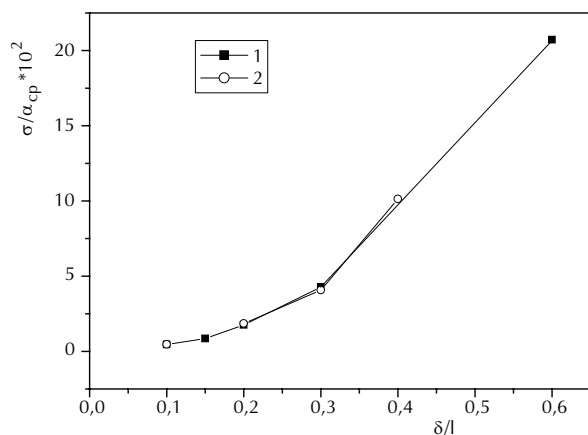


Рис. 4. Зависимость погрешности метода от шага расположения термопар: 1 – гладкая труба; 2 – труба с канавками

Как видно из графиков, при относительном шаге расположения термопар 0,3 и ниже среднеквадратичное отклонение коэффициентов теплоотдачи укладывается в 5%. Далее, при увеличении шага, отклонения резко возрастают.

Совпадение графиков для гладкой трубы и трубы с канавками, очевидно, связано с тем, что для расчетов использовались «идеальные» (расчетные) данные по температуре. В реальности же наличие погрешностей при измерениях температур должно сделать применение участка с канавками более предпочтительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения осредненных значений тепловых потоков на стенке (распределения коэффициента теплоотдачи), основанный на решении обратной задачи теплопроводности позволяет делать это с допустимой погрешностью. Величина погрешности зависит от шага расположения термопар по закону близкому квадратичному.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16263) и ведущей научной школы (грант НШ-8574.2006.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коверьянов В.А.** Обратная задача нестационарной теплопроводности // Теплофизика высоких температур. 1967. Т.5. №1. С. 141–148.
2. **Алифанов О.М.** Граничные обратные задачи теплопроводности // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. XXIX. №1. С. 13–25.
3. **Теория** тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 496 с.
4. **Михеев Н.И., Давлетшин И.А.** Метод измерения осредненных значений коэффициента теплоотдачи в сложных течениях // Известия РАН. Энергетика. 2005. №6. С. 16–19.