

Е. А. Колядин, С. В. Виноградов, Д. А. Кагин

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООТДАЧИ И АЭРОДИНАМИКИ В УТИЛИЗАЦИОННЫХ ГАЗОТРУБНЫХ КОТЛАХ С ВИНТОВЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ ВСТАВКАМИ

Введение

Для проведения экспериментальных исследований была спроектирована и изготовлена экспериментальная модельная установка [1], для которой была разработана и обоснована методика экспериментальных исследований. На этой установке был выполнен основной объем экспериментов и получены данные для дальнейшего анализа и сопоставления с результатами других испытаний, выполненных различными исследователями в данной области [2–4].

Целью экспериментальных исследований являлось изучение закономерностей тепловых и аэродинамических процессов и получение зависимостей для расчета теплообмена $Nu = f(Re, S/d)$ и аэродинамических сопротивлений $\xi = f(Re, S/d)$, применяемых в инженерных расчетах утилизационных котлов с винтовыми ленточными вставками.

Результаты экспериментальных исследований

При проведении эксперимента поочередно применялись 5 винтовых ленточных вставок, выполненных из стального листа толщиной 2 мм. Полный шаг (S) между соседними витками вставок варьировался таким образом, чтобы получить относительные шаги (S/d) 6, 7, 8, 10, 12.

Перед проведением основного эксперимента был исследован теплообмен гладкой трубы (без установки вставок), который показал, что отклонение экспериментальных данных по теплообмену и аэродинамике от известных зависимостей $Nu = 0,02 \cdot Re^{0,8}$ и $\xi = 0,316 \cdot Re^{-0,25}$ составляет +14 %. Данное отклонение теплообмена для гладкой трубы от литературных данных в сторону увеличения теплообмена связано с отсутствием в экспериментальной установке участка гидродинамической стабилизации потока воздуха (как в экспериментах, при которых была получена данная зависимость). Это связано с наличием у модели и у прототипа (утилизационного газотрубного котла) входной расширительной камеры. При этом поток воздуха при входе в трубу из большого объема расширительной камеры турбулизируется, что приводит к увеличению теплопередачи. Отклонение по аэродинамическому сопротивлению от формулы Блазиуса связано с шероховатостью экспериментальной трубы.

Экспериментальные исследования теплообмена и аэродинамики всех использованных винтовых ленточных вставок проводились в одинаковых условиях, по единой методике и на одной экспериментальной установке. Это обеспечило тождественность условий и возможность сопоставления полученных данных.

На рис. 1, *а* показаны зависимости $Nu = f(Re)$ в логарифмическом масштабе, характеризующие повышение теплоотдачи по сравнению с полой трубой для вставок с разными постоянными относительными шагами винтовой линии. Для сравнения приведены зависимости для полой трубы: экспериментальная и построенная по общепринятой зависимости $Nu = 0,02 \cdot Re^{0,8}$. Интересной представляется оценка влияния относительного шага закрутки винтовой вставки на интенсивность теплообмена, представленная на рис. 1, *б* в виде изменения Nu при различных Re .

Одновременно с исследованиями теплообмена, его особенностей при охлаждении воздуха в трубах с установленными внутри винтовыми ленточными вставками, проводились измерения аэродинамических сопротивлений. Полученные величины сопротивлений Δp позволили определить экспериментальные значения коэффициента аэродинамического сопротивления трубы с винтовыми ленточными вставками. Для прямой гладкой трубы коэффициент аэродинамического сопротивления, полученный в экспериментах, практически соответствовал расчетным значениям по известной из литературы зависимости $\xi = 0,316 \cdot Re^{-0,25}$.

На рис. 2, *а* показаны зависимости $\xi = f(Re)$, характеризующие повышение аэродинамического сопротивления по сравнению с полой трубой для вставок с разными шагами закрутки. Интересной представляется оценка влияния относительного шага закрутки винтовой вставки на аэродинамическое сопротивление, представленная на рис. 2, *б* в виде изменения ξ при различных Re .

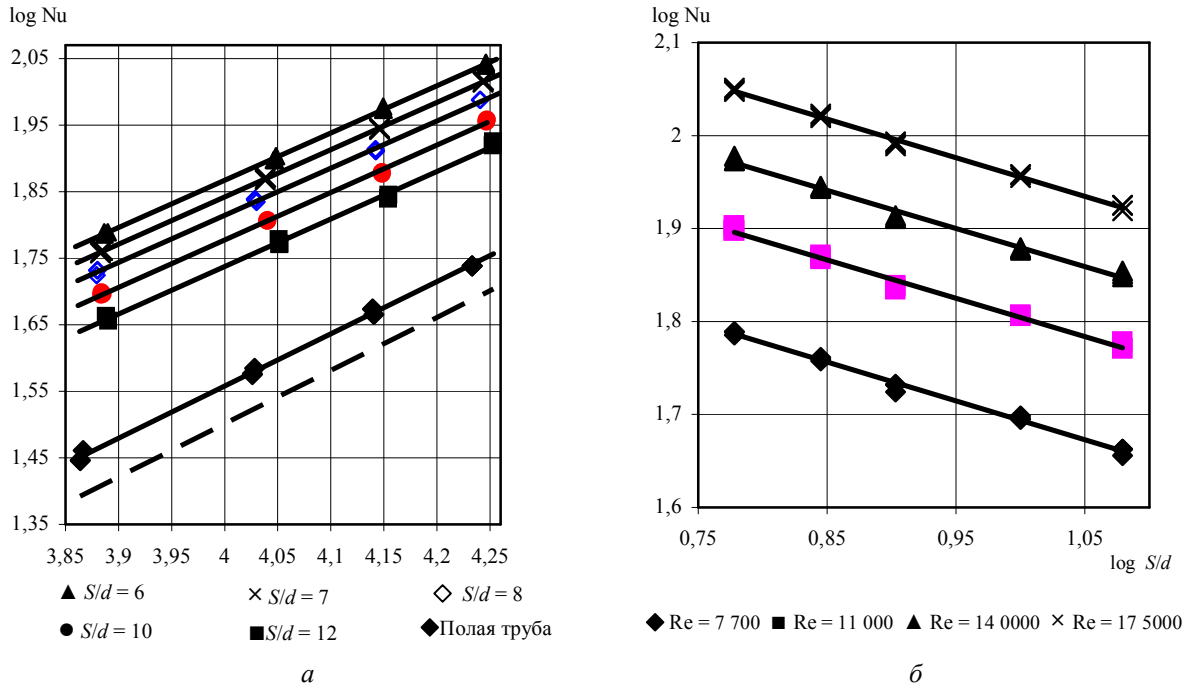


Рис. 1. Зависимости изменения теплоотдачи: а – от Re при различных S/d ; б – от S/d при различных Re

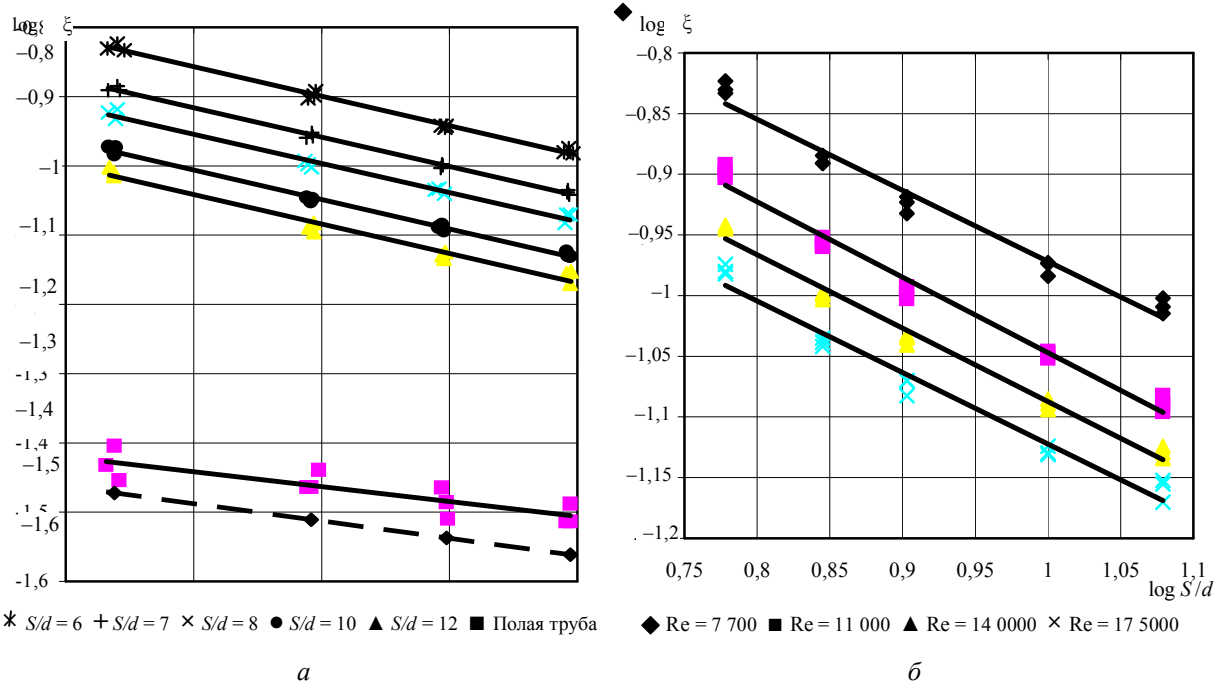


Рис. 2. Зависимости изменения аэродинамического сопротивления: а – от Re при различных S/d ; б – от S/d при различных Re

Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных производилась математическим методом в виде безразмерных критериальных зависимостей вида: $Nu = A \cdot Re^n$, $Nu = C \cdot (S/d)^k$, $\xi = B \cdot Re^m$ и $\xi = E \cdot (S/d)^h$ для каждой винтовой ленточной вставки. Показатели степени k , n , m , h в критериальных уравнениях определялись расчетом на основании математической обработки экспериментальных данных (характеризуются тангенсом угла наклона соответствующей прямой к оси абсцисс), а постоянные A , B , C , E – из соотношения для любой точки соответствующей прямой: $A = Nu/Re^n$, $B = \xi/Re^m$, $C = Nu/(S/d)^k$, $E = \xi/(S/d)^h$.

В табл. 1, 2 сведены результаты обобщения данных по теплообмену и аэродинамике.

Таблица 1

**Результаты обработки экспериментальных данных
по теплообмену и аэродинамике для вставок с различным S/d**

Относительный шаг S/d	$Nu = A \cdot Re^n; 7,7 \cdot 10^3 < Re < 17,5 \cdot 10^3$		$Nu_{\text{инт}} / Nu_0$	$\xi = B \cdot Re^m; 7,7 \cdot 10^3 < Re < 17,5 \cdot 10^3$		$\xi_{\text{инт}} / \xi_0$
	A	n		B	m	
6	0,107	0,71	2,1	6,76	-0,427	3,6
7	0,101	0,71	1,9	5,74	-0,424	3,2
8	0,094	0,71	1,8	5,11	-0,421	2,9
10	0,087	0,71	1,7	4,75	-0,426	2,6
12	0,079	0,71	1,6	4,34	-0,425	2,4

Таблица 2

**Результаты обработки экспериментальных данных
по теплообмену и аэродинамике для вставок с различным Re**

Re	$Nu = C \cdot (S/d)^k; 6 < S/d < 12$		$\xi = E \cdot (S/d)^h; 6 < S/d < 12$	
	C	k	E	h
7 700	127,2	-0,41	0,41	-0,585
11 000	164,0	-0,41	0,38	-0,621
14 000	194,0	-0,41	0,33	-0,605
17 500	230,5	-0,41	0,29	-0,590

Обобщенные аналитические зависимости

На основе результатов обработки экспериментальных данных получены обобщенные аналитические зависимости для расчета теплоотдачи и аэродинамического сопротивления в трубах утилизационного котла с винтовыми ленточными вставками в виде $Nu = f(Re, S/d)$ и $\xi = f(Re, S/d)$.

Обобщение данных по теплообмену показало, что максимальное отклонение экспериментальных значений от обобщающей кривой не превышает $\pm 4\%$ при вероятности 100%. Таким образом, теплоотдача в пределах изменения параметров, имевших место в эксперименте ($6 < S/d < 12; 7,7 \cdot 10^3 < Re < 17,5 \cdot 10^3$), с доверительным интервалом $\pm 3\%$ и вероятностью 97% описывается обобщающей аналитической зависимостью

$$Nu = 0,2216 \cdot Re^{0,71} \cdot (S/d)^{-0,41}.$$

Анализ данных по аэродинамическим сопротивлениям показал, что максимальное отклонение экспериментальных значений от обобщающей кривой (доверительный интервал) не превышает $\pm 6\%$. Таким образом, аэродинамическое сопротивление в пределах изменения параметров, имевших место в эксперименте ($6 < S/d < 12; 7,7 \cdot 10^3 < Re < 17,5 \cdot 10^3$), с доверительным интервалом $\pm 5\%$ и вероятностью 93% описывается обобщающей аналитической зависимостью

$$\xi = 18,9 \cdot Re^{-0,425} \cdot (S/d)^{-0,6}.$$

Заключение

Полученные зависимости позволяют достаточно просто оценить увеличение теплоотдачи и аэродинамического сопротивления газового потока при применении винтовых ленточных вставок с различными геометрическими характеристиками и на основе оценки подобрать наилучший вариант геометрии вставки для конкретной конструкции рекуперативного теплообменника с разнофазными теплообменивающимися средами. Полученные расчетные зависимости рекомендуются при подборе винтовых ленточных вставок для интенсификации теплообмена в конвективных поверхностях утилизационных газотрубных котлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колядин Е. А. Влияние закрутки потока газов на конвективный теплообмен в утилизионных газотрубных котлах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. – 2007. – № 2 (37). – С. 159–162.
2. Ермолин В. К. Интенсификация конвективного теплообмена в трубе в условиях закрученного потока с постоянным по длине шагом // Инженерно-физический журнал. – 1960. – № 11 (т. III). – С. 52–57.
3. Делягин Г. Н. Конвективный теплообмен в завихренном потоке под давлением // Тепло- и массоперенос. – 1963. – Т. 3. – С. 160–168.
4. Щукин В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил – М.: Машиностроение, 1970. – 240 с.

Статья поступила в редакцию 31.01.2008

**THE RESULTS OF THE RESEARCH
INTO HEAT-TRANSFER PROCESSES AND AERODYNAMICS
IN GAS-TUBE RENDERING BOILERS
WITH SCREW BELT INSERTIONS**

E. A. Kolyadin, S. V. Vinogradov, D. A. Kagin

The mathematical analysis of the experimental results is made. The equations are derived; they help easily to evaluate the increase of heat-transfer and aerodynamic resistance of gas flow by using screw insertions with different geometric characteristics for heat exchange intensification, and on the basis of the evaluation to choose the best type of insertion geometry for the special configuration of gas-tube rendering boilers.

Key words: rendering boiler, heat transfer, aerodynamic resistance, heat exchange intensification.