

## ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

### АННОТАЦИЯ

Получены экспериментальные данные о структуре турбулентного потока при стационарном течении газа в круглой трубе, при плавных ускоренном и замедленном режимах течения. По этим данным рассчитаны коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления для нестационарных течений. Подтверждены предположения о значительном отличии коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления от квазистационарных при ускорении и замедлении воздушного течения. Предложенные модели для расчета теплообмена и гидродинамики могут быть использованы на практике.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Расчеты нестационарных тепловых и гидродинамических процессов становятся в ряд определяющих при разработке новых образцов техники в различных областях: в авиации и космонавтике, энергетике, судостроении, криогенной технике, химической технологии и других. Особое место занимают вопросы безопасности и надежности, обуславливающие необходимость расчета аварийных режимов, которые являются существенно нестационарными.

Очевидно, что инженерные расчеты по теплообмену и гидродинамике могут быть выполнены при условии фундаментального изучения нестационарных процессов. Лишь органичное сочетание фундаментальных и прикладных исследований является наиболее эффективным путем получения практических результатов.

Экспериментальные и теоретические исследования показывают существенное отличие коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в нестационарных условиях от данных квазистационарного расчета. Оно может достигать 3–4-кратного значения. Основной причиной этого отличия является специфическое изменение турбулентной структуры потока теплоносителя.

Проведенные в МАИ исследования турбулентной структуры потоков показали существенное влияние ускорения и замедления течения на структуру потока.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния гидродинамической нестационарности при изотермических и неизотермических условиях на теплообмен и гидродинамику течения турбулентного потока газа в цилиндрическом канале.

### 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились в условиях гидродинамической нестационарности, т.е. при изменении во времени расхода газа ( $\frac{\partial G}{\partial \tau} \neq 0$ ) – ускорении и замедлении. Отметим, что оба режима течения (ускорение и замедление) изучались по отдельности, без создания колебательных процессов. Неизотермичность течения достигалась путем нагрева стенки канала и характеризовалась температурным фактором  $T_w/T_f = 1...1.18$ . Система измерений позволяет фиксировать измеряемые параметры с частотой до 2500 Гц [1].

Совпадение полученного авторами профиля осевой скорости в стационарных условиях с данными Рейхардта [2], Кармана [3] (в пределах 10 %), по профилям пульсаций с данными Лауфера [4] и Коннт-Белло [5] (в пределах 10...12 %) показали правильность используемой методики [1].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования турбулентных нестационарных течений позволили по данным о структуре потоков рассчитать коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления в нестационарных условиях.

В качестве критерия гидродинамической нестационарности предложен безразмерный параметр

$$K_g^* = \frac{\partial G}{\partial \tau} \frac{1}{G} \sqrt{\frac{d}{g}}, \quad (1)$$

где  $G$  – расход газа, кг/с;  $\tau$  – время, с;  $d$  – диаметр канала, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

#### 3.1. Влияние гидродинамической нестационарности на теплообмен

Как уже было отмечено в предыдущих работах [6–8], автором обнаружено увеличение теплоотдачи при ускорении потока и уменьшение – при замедлении.

Число Нуссельта рассчитано по структурным параметрам потока [9].

На рис. 1 и 2 приведены графики изменения коэффициента теплоотдачи, рассчитанного по экспериментальным данным ( $Re = 9300 \dots 28000$ ,  $|K_g^*| = 0...0.111$ ,  $T_w/T_f = 1.18$ ,  $d = 0.0428$  м), и экспериментальные данные по теплоотдаче, полученные Э.К. Калининым и Г.А. Дрейцером [6]. Следует отметить, что не найдено качественных различий

между данными, полученными автором и экспериментальными данными по теплоотдаче [6]. При ускорении потока (рис. 1) отличие не превышает 8–10 %. При замедлении потока (рис. 2) различие в величинах в среднем находится в пределах 20 %.

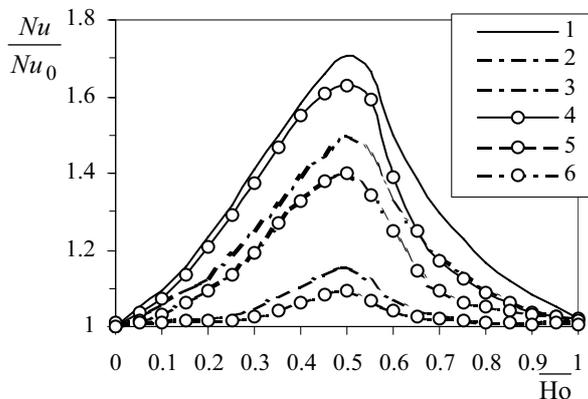


Рис. 1. Влияние ускорения потока на теплообмен при  $Re = 9300 - 28000$ ,  $T_w/T_f = 1,18$  (1–3 – автор, 4–6 – эксперимент [6]): 1 –  $K_g^*_{max} = 0,111$ , 2 – 0,067, 3 – 0,022, 4 – 0,111, 5 – 0,067, 6 – 0,022

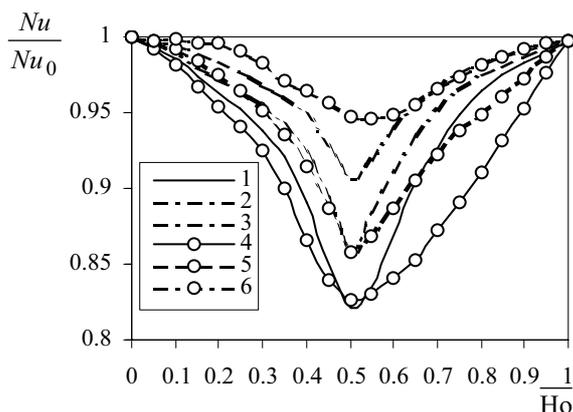


Рис. 2. Влияние замедления потока на теплообмен при  $Re = 9300 - 28000$ ,  $T_w/T_f = 1,18$  (1–3 – автор, 4–6 – эксперимент [6]): 1 –  $K_g^*_{min} = -0,111$ , 2 – -0,067, 3 – -0,022, 4 – -0,111, 5 – -0,067, 6 – -0,022

Величина  $K_g^*_{max}$  – это максимальное из всех значение  $K_g^*$  на протяжении всего нестационарного процесса, а именно в середине процесса. Величина  $K_g^*_{min}$  – это минимальное значение  $K_g^*$  на протяжении всего нестационарного процесса. При небольших числах Рейнольдса ( $Re = 3100 \dots 9300$ ) автором отмечен замедленный возврат коэффициента теплоотдачи к стационарному значению после снятия нестационарного воздействия. Причем это происходит тем медленнее, чем меньше число Рейнольдса. Такой же эффект был обнаружен при экспериментальных исследованиях теплоотдачи [6].

На основе проведенных расчетов получены модели для инженерных расчетов коэффициента теплоотдачи. При разработке модели за основу была взята формула для расчета теплообмена при стационарных условиях:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.43}, \quad (2)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта,  $Re$  – критерий Рейнольдса,  $Pr$  – критерий Прандтля.

Для учета нестационарных условий вместо числа  $Re$  предложено использовать модифицированное число Рейнольдса  $Re_m$ , которое является функцией стационарного числа Рейнольдса и нестационарных параметров течения. Выше объяснялось, что введение только лишь критерия гидродинамической нестационарности  $K_g^*$  недостаточно, поскольку автором установлено, что параметры турбулентных нестационарных течений зависят и от безразмерного времени процесса  $\overline{No}$  [9].

$$\overline{No} = \frac{No}{No_0}, \quad (3)$$

где  $No$ ,  $No_0$  – критерии гомохронности, соответствующие текущему и общему времени нестационарного процесса.

Итак, расчетные соотношения для рассматриваемой задачи можно записать в виде

$$Re_m = f(Re, K_g^*, \overline{No}); \quad (4)$$

при ускорении течения:

$$Re_m = Re \left[ (0.94 + 1.18\overline{No}) \exp(-|\overline{No} - 0.5|) \times \sqrt{0.48 + 10.4K_g^* + 4.1 \cdot 10^3} \right]; \quad (5)$$

и при замедлении течения:

$$Re_m = Re \left[ (2.26 + 1.27\overline{No}) \exp(-|\overline{No} - 0.5|) \times \sqrt{0.25 + 2.27K_g^* + 2.2 \cdot 10^3} \right], \quad (6)$$

где  $\overline{No}$  – безразмерное время процесса,  $Re$  – критерий Рейнольдса,  $K_g^*$  – критерий гидродинамической нестационарности.

Обратим внимание, что данные модели могут быть использованы для расчета теплообмена в любой момент времени нестационарного процесса. Необходимо использовать текущие (мгновенные) значения параметров  $K_g^*$  и  $\overline{No}$ .

Аппроксимация экспериментальных данных проводилась с помощью пакета программ «Statistica 6.0». Погрешность аппроксимации не превышает 5%.

### 3.2. Влияние гидродинамической нестационарности на гидродинамику течения

Проведенные до настоящего времени экспериментальные исследования влияния ускорения и замедления течения на коэффициент гидравлического сопротивления не позволяют дать однозначный ответ о том, насколько велико это влияние, о его характере и о возможности применения квазистационарного подхода. Авторы [10, 11] сделали вывод о применимости квазистационарного метода расчета для турбулентных течений. В [12] говорится о том, что неучет зависимости коэффициента гид-

равлического сопротивления  $\xi$  от нестационарности потока приводит к большим ошибкам. Эксперименты [13, 14] выявили значительное влияние гидродинамической нестационарности на  $\xi$ .

Полученные автором данные о структуре течений были использованы для расчета влияния гидродинамической нестационарности на коэффициент гидравлического сопротивления [9].

При разработке модели расчета зависимость коэффициента гидравлического сопротивления представлялась в виде

$$\xi = f(\xi_0, \overline{Ho}, K_g^*), \quad (7)$$

где

$$\xi_0 = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}. \quad (8)$$

Получены зависимости для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в изотермических ( $T_w/T_f = 1$ ) условиях для ускорения течения:

$$\xi = \xi_0 (0.212 + 0.126 \overline{Ho}) \exp(-|\overline{Ho} - 0.33|) \times \\ \times (0.25 + 2.27 K_g^*)^{-0.5}; \quad (9)$$

для замедления течения:

$$\xi = \xi_0 (\exp(0.408|\overline{Ho} - 0.4|)(0.821 + 0.48 K_g^*)^2 + \\ + 0.005); \quad (10)$$

в неизотермических условиях ( $T_w/T_f = 1.18$ ) при ускорении течения:

$$\xi = \xi_0 (0.31 + 0.38 \overline{Ho}) \exp(-|\overline{Ho} - 0.3|) \times \\ \times (0.001 - 0.006 K_g^*)^{-0.2}; \quad (11)$$

при замедлении течения:

$$\xi = \xi_0 (\exp(0.79|\overline{Ho} - 0.4|)(0.56 + 0.48 K_g^*) + \\ + 0.0068). \quad (12)$$

где  $\overline{Ho}$  – безразмерное время процесса,  $\xi_0$  – коэффициент гидравлического сопротивления в стационарных условиях,  $K_g^*$  – критерий гидродинамической нестационарности.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления при ускорении и замедлении потока соответственно: 1 – квазистационарный расчет, 2 – расчеты по зависимостям [14], 3 – расчеты по зависимостям [13], 4 – экспериментальные значения, полученные автором.

Можно отметить, что при качественном совпадении нестационарный эффект, полученный в расчетных зависимостях автора в несколько раз выше, чем в [13] и [14]. Это можно объяснить тем, что в [13] и [14] эксперименты проводились при течении воды, а автором – при течении воздуха. Стоит отметить еще одно важное отличие: в [13] и [14] максимальный эффект влияния нестационарности наблюдался при максимальном ускорении/замедлении потока, в наших экспериментах и расчетах – немного раньше, при  $\overline{Ho} = 0.35$ . Это легко объясняется

тем, что коэффициент гидравлического сопротивления зависит от касательных напряжений на стенке, и именно при  $\overline{Ho} = 0.35$  наблюдаются наибольшие изменения структуры течения у стенки канала. Данный эффект авторами [13] и [14] скорее всего не был обнаружен из-за малой инерции турбулентной структуры потока при течении воды.

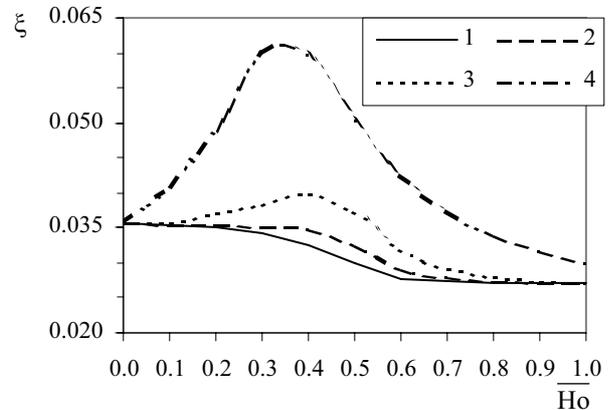


Рис. 3. Влияние ускорения потока на коэффициент гидравлического сопротивления ( $Re = 6200 - 18700$ ,  $T_w/T_f = 1$ ): 1 – квазистационарный расчет, 2 – эксперимент [14], 3 – эксперимент [13], 4 – автор

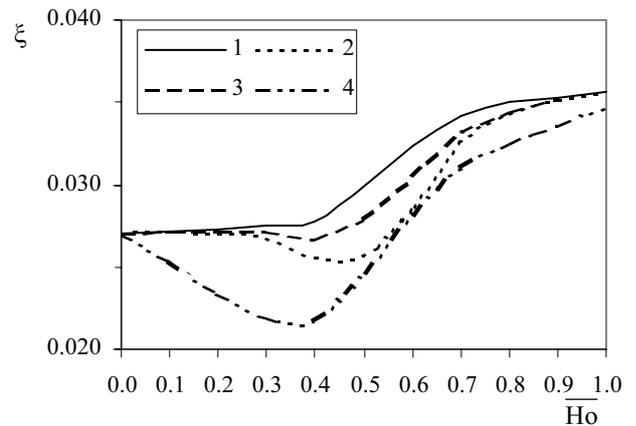


Рис. 4. Влияние замедления потока на коэффициент гидравлического сопротивления ( $Re = 6200 - 18700$ ,  $T_w/T_f = 1$ ): 1 – квазистационарный расчет, 2 – эксперимент [14], 3 – эксперимент [13], 4 – автор

С ростом числа Рейнольдса влияние нестационарности на гидродинамику ослабевает. В неизотермических условиях обнаружено существенное замедление восстановления коэффициента гидравлического сопротивления после снятия нестационарного воздействия. В изотермических условиях этот процесс происходит практически мгновенно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных по структуре нестационарных турбулентных течений прове-

дены расчеты коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления.

Получены модели для практических расчетов коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления для изотермических ( $T_w/T_f=1$ ) и неизотермических ( $T_w/T_f=1.18$ ) воздушных течений в диапазоне чисел  $Re=3100\dots 28000$ .

Данные зависимости могут быть использованы для инженерных расчетов элементов теплонапряженных конструкций, работающих в нестационарных условиях в исследуемом диапазоне режимных параметров.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $d$  – диаметр канала, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  
 $Ho$  – критерий гомохронности;  
 $Ho_0$  – критерий гомохронности, соответствующий общему времени процесса;  
 $\overline{Ho}$  – безразмерный критерий гомохронности;  
 $G$  – расход газа, кг/с;  
 $K_g^*$  – критерий гидродинамической нестационарности;  
 $Nu$  – критерий Нуссельта;  
 $Pr$  – критерий Прандтля;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $T_w$  – температура стенки канала, К;  
 $T_f$  – средняя температура воздуха в данном сечении канала, К;  
 $T_w/T_f$  – температурный фактор;  
 $y$  – расстояние от стенки канала, м;  
 $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  
 $\tau$  – время, с.

Индексы:

- max – максимальное из всех значение;  
min – минимальное из всех значение;  
м – модифицированный параметр;  
0 – стационарный параметр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрейцер Г.А., Краев В.М. Турбулентные течения газа при гидродинамической нестационарности. Красноярск: Изд-во Сибирской аэрокосмической академии, 2001. 148 с.
2. Reichardt H. Volstaendige Darstellung der Turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen // Zeitschrift fuer angewaelende Mathematik und Mechanik. 1951. N. 7. P. 132.
3. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974. 408 с.
4. Laufer J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow // NASA Reports, 1954. TR 1174.
5. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в каналах с параллельными стенками. М.: Мир, 1968. 176 с.
6. Нестационарный теплообмен / В.К. Кошкин, Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер и др. М.: Машиностроение, 1973. 328 с.
7. Kalinin E.K., Dreitzer G.A. Unsteady convective heat transfer in channels // Advances in Heat Transfer, 1994. Vol. 25. P. 1–150.
8. Дрейцер Г.А. Нестационарный конвективный теплообмен при турбулентном течении газов и жидкостей в каналах // Теплоэнергетика. 1998. № 12. С. 29.
9. Влияние гидродинамической нестационарности на теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубе / В.Б. Бухаркин, В.М. Краев // Труды 3-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т.2. С.71–74.
10. Daily I.W., Hanrew W.L., Olive K.W., Jordan J.M. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flow through smooth tubes and orifices // Trans. ASME. 1956. Vol.78. N 9. P. 1071 – 1077.
11. Расчет неустановившегося напорного движения несжимаемой жидкости в жестких цилиндрических трубах / А.М. Айтсам, Л.Л. Пааль, У.Р. Лийв // Тр. Таллин. политехн. ин-та. 1965. Сер. А. № 223. С. 3 – 19.
12. Нестационарные течения в трубах / И.С. Коченов, Ю.Н. Кузнецов // Тепло- и массоперенос. Минск: Наука и техника, 1965. Т. 1. С. 306 – 314.
13. Никифоров А.Н., Герасимов С.В. Изменение параметров турбулентного течения при ускорении и замедлении потока // Инженерно-физический журнал. 1985. №49(4). С. 533 – 539.
14. Марков С.Б. Экспериментальное исследование скоростной структуры и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных потоках // Механика жидкости и газа. 1973. № 2. С. 65 – 75.