

УДК 532.5.013.12

ОНИЩЕНКО В.Н., ХАЛАТОВ А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ ДВУХРЯДНОЙ СИСТЕМЫ УГЛУБЛЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Часть 1. Гидравлическое сопротивление

Виконано аналіз впливу форми та глибини заглиблень на гідравлічний опір. Показано, що найбільший опір мають дворядні системи квадратної форми глибиною $h/D = 0,20$, а найменший – циліндричні заглиблення глибиною $h/D = 0,20$.

Выполнен анализ влияния формы и глубины углублений на гидравлическое сопротивление. Показано, что наибольшим сопротивлением обладают двухрядные системы квадратной формы глубиной $h/D = 0,20$, а наименьшим – цилиндрические углубления глубиной $h/D = 0,20$.

The analysis of influence of form and depth of dimples is executed on hydraulic resistance. It is shown that most resistance is possessed by the double-row systems of square form in depth $h/D = 0.20$, and the least – cylindrical dimples in $h/D = 0.20$ depth.

c – расстояние между датчиками;
 D – диаметр углубления;
 H – высота канала;
 h – глубина углубления;
 L – сторона квадрата;
 N – диагональ квадрата;
 P – статическое давление;
 $Re_{2H} = W \cdot 2H / \nu$ – число Рейнольдса;

S – относительный шаг;
 W_∞ – скорость потока на входе в канал;
 ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 ρ – плотность потока;
 ν – кинематический коэффициент вязкости.

Индексы:

x, y – прямоугольные координаты;
 ∞ – параметры в ядре потока.

Введение

В различных технических устройствах актуальной является задача создания компактных устройств с минимальными энергетическими затратами. Традиционно применяемые методы интенсификации теплообмена (ребра, выступы различной формы, закрутка потока, турбулизация) приводят к большим гидравлическим потерям, поскольку при этом формируются вихревые структуры, большая часть которых диссипирует в основном потоке и не достигает поверхности теплообмена. В работе [1] показано, что поверхности, покрытые углублениями различной формы, формируют вихревые структуры, направленные к поверхности канала, что в ряде случаев приводит к благоприятному соотношению между интенсификацией теплообмена и сопутствующими

потерями давления. В частности, в работе Кубанского П.Н. [2] показано, что при обтекании поверхности, покрытой глубокими цилиндрическими углублениями, могут возникать особые условия обтекания, способствующие существенному снижению гидравлических потерь. Это обусловлено формированием циркуляционного течения внутри углубления и выходящих наружу вихревых “катков”, по которым движется основной поток. Такие же “катки” создаются за счет периодического срыва вихрей с устьев цилиндрического углубления. Таким образом, возникают условия, при которых трение качения может частично заменяться трением скольжения.

В настоящей работе выполнено экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических характеристик потока около плоской поверхности с двухрядной системой

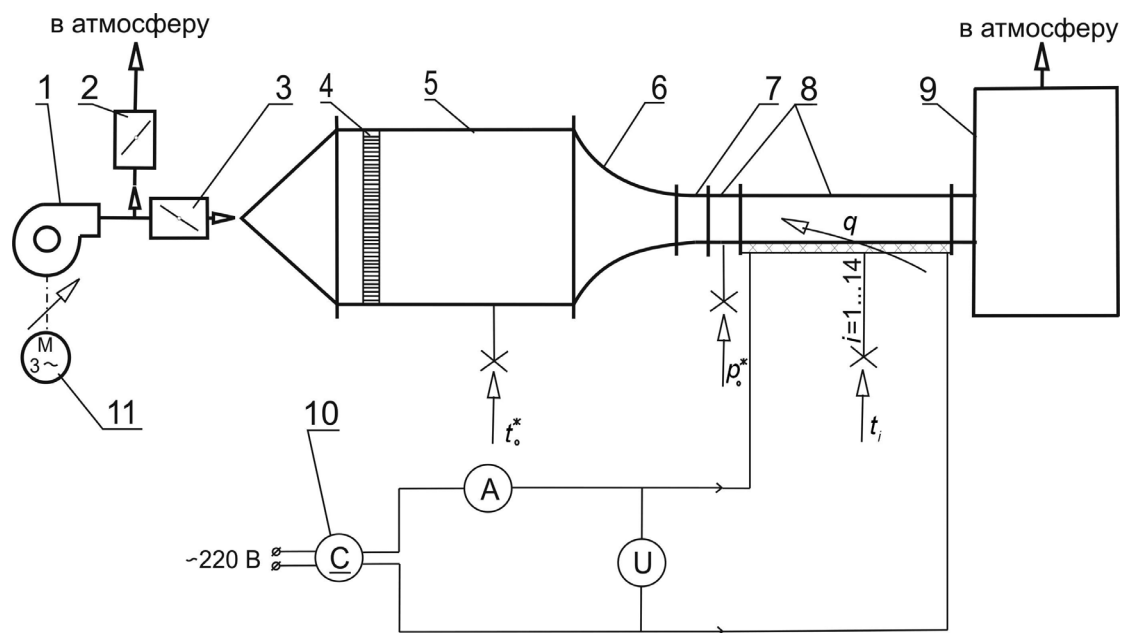


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – центробежный вентилятор; 2, 3 – поворотный затвор; 4 – мелкаячеистая сетка; 5 – ресивер; 6 – сопло Витошинского; 7 – участок стабилизации; 8 – экспериментальный участок; 9 – успокоитель с переходником; 10 – преобразователь; 11 – электродвигатель; p_0^* – полное давление; t_0^* – полная температура; t_i – температура поверхности экспериментального участка.

сферических, цилиндрических и квадратных углублений, расположенных в шахматном порядке. Такая конфигурация моделирует поверхность теплообмена с периодическим расположением на ней двухрядных углублений.

Экспериментальная установка

Экспериментальный стенд (рис. 1) представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа. Воздух от центробежного вентилятора ВВД–5 1 подается в ресивер 5 и далее через входное сопло 6 и участок стабилизации 7 поступает в экспериментальный участок 8. Ресивер, в котором установлена мелкаячеистая сетка 4, предназначен для “сглаживания” объемных пульсаций потока и выравнивания поля скорости потока по сечению. Профилирование входного сопла 6 по кривой Витошинского обеспечивает достаточно равномерный профиль скорости перед экспериментальным участком с толщиной пограничного слоя не более 1,0 мм. Дополнительная магистраль с поворотным затвором 2 используется для

сброса избыточного воздуха в атмосферу и изменения расхода воздуха через экспериментальный участок. Установка снабжена системой необходимых измерений.

Двухрядная система углублений

Перед экспериментальным участком устанавливалась сменная прямоугольная пластина из органического стекла длиной 61 мм и шириной 333 мм, на которой выполнены два ряда поверхностных углублений сферической, цилиндрической или квадратной формы (рис. 2).

Углубления в двухрядной системе расположены в шахматном порядке таким образом, что их центры образуют равнобедренный треугольник с основанием, равным поперечному шагу углублений S_y . Относительный шаг в продольном направлении S_x/D равен 0,64, относительная глубина h/D для сферических и цилиндрических углублений составляет 0,20 и 0,30, а для квадратного углубления – 0,30. Основные параметры исследованных углублений приведены в таблице.

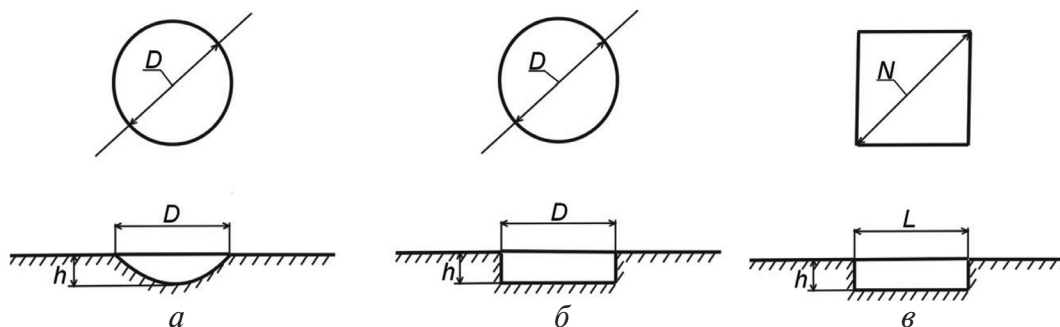


Рис. 2. Схема поверхностных углублений на поверхности: а – сферическое; б – цилиндрическое; в – квадратное углубление.

Таблица. Основные параметры исследованных углублений

Форма	Глубина, h , мм	Диаметр, D , мм	Диагональ, N , мм	Сторона, L , мм
Сфера	5,0 и 7,5	25,0	–	–
Цилиндр	5,0 и 7,5	25,0	–	–
Квадрат	5,0 и 7,5	–	31,0	22,0

Гидравлические потери

Скорость набегающего потока в экспериментах изменялась от 4,1 до 16,6 м/с, число Рейнольдса Re_{2H} составляло 18000...76000, а темпе-

ратура потока T_{∞} менялась от 26 до 28 °С. Коэффициент гидравлического сопротивления двухрядной системы определялся в соответствии с выражением:

$$\zeta = \frac{2\Delta P}{\rho W_{\infty}^2 \frac{c}{2H}}$$

где ΔP – разность статических давлений, измеряемая перед двухрядной системой углублений и за ней (рис. 3). Статическое давление перед первым и за вторым рядом углублений осреднялось в поперечном направлении за счет его измерения в двух характерных точках.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления двухрядной системы сферических углублений от числа Рейнольдса. В исследованном диапазоне наибольшим сопротивлением обладают двухрядные сферические углубления относительной глубиной $h/D = 0,30$. Это обусловлено незначительным масштабом вихревой структуры в “мелких” сферических углублениях ($h/D = 0,20$): вихрь, формируемый в углублении, имеет малый размер

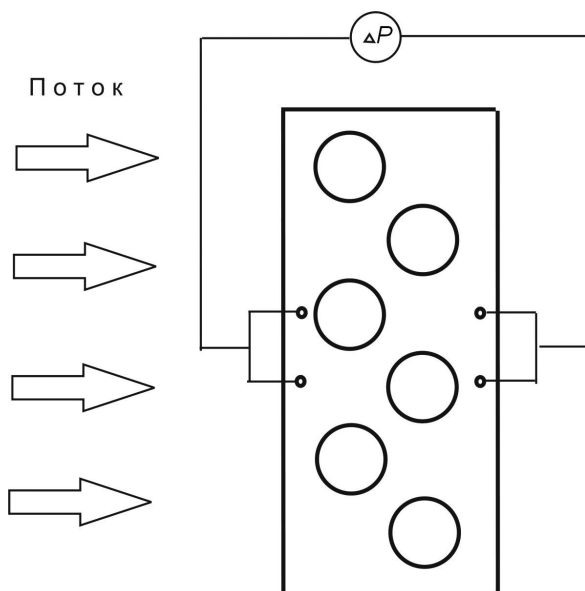


Рис. 3. Схема определения гидравлического сопротивления двухрядной системы углублений.

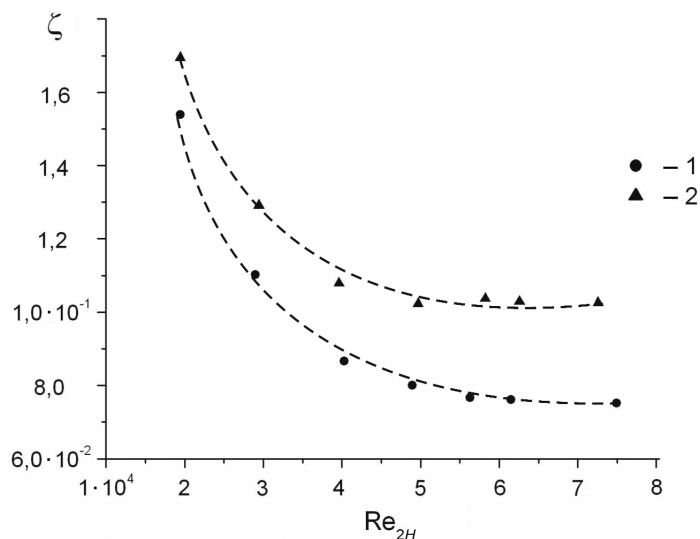


Рис. 4. Гидравлическое сопротивление двухрядной системы сферических углублений: 1 – $h/D = 0,20$; 2 – $h/D = 0,30$.

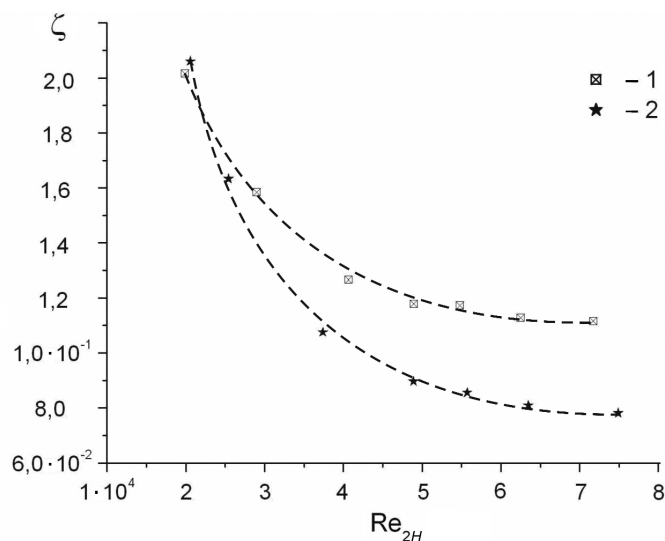


Рис. 5. Гидравлическое сопротивление двухрядной системы квадратных углублений: 1 – $h/D = 0,20$; 2 – $h/D = 0,30$.

и практически не выступает над кромкой углубления в основной поток.

В более глубоких углублениях ($h/D = 0,30$) формируется вихревая структура, выступающая в основной поток и взаимодействующая с ним, что приводит к росту гидравлических потерь. Тенденция роста гидравлического сопротивления с увеличением глубины одиночного сферического углубления и многорядных сферических углублений подтверждается и в других исследованиях [1].

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления двухрядной системы квадратных углублений от числа Рейнольдса. В данном случае во всем диапазоне изменения числа Рейнольдса система квадратных углублений глубиной $h/D = 0,20$ имеет более высокий коэффициент сопротивления, чем система с $h/D = 0,30$. Такой характер его поведения позволяет сделать вывод, что вихревая структура, формируемая в квадратных углублениях, обладает особыми свойствами, снижающими потери давления при обтекании более глубоких углублений. Как первое приближение может приниматься гипотеза о возникновении режима трения качения, когда поток движется по “вихревым каткам”, формируемым вихревой структурой, генерируемой квадратными углублениями.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления двухряд-

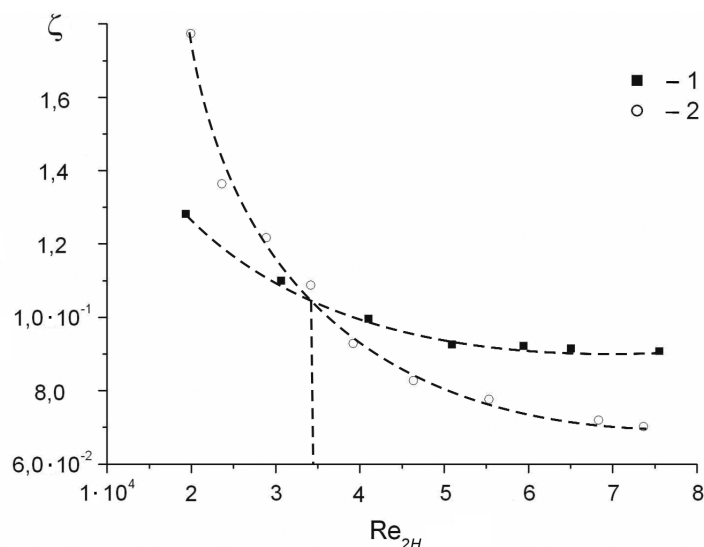


Рис. 6. Гидравлическое сопротивление двухрядной системы цилиндрических углублений: 1 – $h/D = 0,20$; 2 – $h/D = 0,30$.

ной системы цилиндрических углублений от числа Рейнольдса. Как следует из рисунка, при $Re_{2H} < 34000$ более высоким сопротивлением обладает система углублений с $h/D = 0,30$, т.е. в этой области наблюдается закономерность, характерная для системы сферических углублений. В области $Re_{2H} > 34000$ поведение коэффициента сопротивления изменяется: “мелкие” углубления ($h/D = 0,20$) оказывают большее гидравлическое сопротивление потоку, чем глубокие

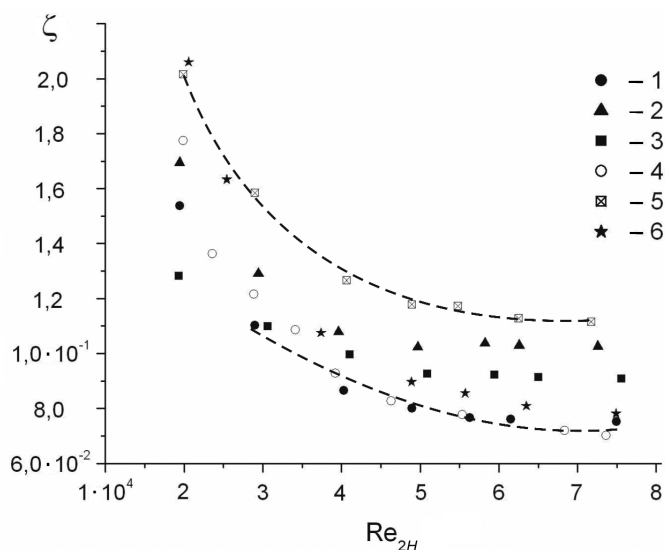


Рис. 7. Гидравлическое сопротивление двухрядных систем углублений:

- 1 — сферические углубления ($h/D = 0,20$);
- 2 — сферические углубления ($h/D = 0,30$);
- 3 — цилиндрические углубления ($h/D = 0,20$);
- 4 — цилиндрические углубления ($h/D = 0,30$);
- 5 — квадратные углубления ($h/D = 0,20$);
- 6 — квадратные углубления ($h/D = 0,30$).

углубления ($h/D = 0,30$). Таким образом, в области больших скоростей набегающего потока формируется специфическая вихревая структура и возникают условия для снижения сопротивления. В данном случае это генерация вторичных течений в цилиндрическом углублении и срыв вихрей с их устьев.

На рис. 7 приведены значения коэффициентов гидравлического сопротивления для углублений различной формы. Наибольшее сопротивление во всем диапазоне изменения числа Рейнольдса имеет система двухрядных углублений квадратной формы глубиной $h/D = 0,20$. Наименьшее сопротивление в области $Re_{2H} < 30000$ имеет двухрядная система цилиндрических углублений глубиной $h/D = 0,20$, а в области $Re_{2H} > 40000$ — система цилиндрических углублений глубиной $h/D = 0,30$ и сферических углублений глубиной $h/D = 0,20$. В промежуточной области чисел Рейнольдса ($Re_{2H} = 30000 \dots 40000$) наименьшее сопротивление имеет система сферических углублений глубиной $h/D = 0,20$.

Выполненное исследование свидетельствует об аномальном характере гидравлического сопротивления при обтекании системы двухряд-

ных углублений: относительно “гладкая” сферическая форма углубления характеризуется ростом сопротивления с увеличением глубины, а “плохообтекаемая” квадратная форма — имеет обратную зависимость. Цилиндрическое углубление имеет различную характеристику в зависимости от величины числа Рейнольдса: при малой скорости ее обтекания ($Re_{2H} < 34000$) оно имеет свойства “гладкого” (рост сопротивления с увеличением глубины), а при большой скорости — “плохообтекаемого” углубления (уменьшение сопротивления с ростом глубины).

В настоящей работе по аналогии с выводами, сделанными в работе [2], высказана предварительная гипотеза о формировании на поверхности двухрядной системы углублений специфической вихревой “сетки” (вихревых “катков”), что может обеспечивать частичный переход от трения скольжения к трению качения. Однако для окончательного ответа требуется более глубокое исследование вихревой структуры потока в углублениях различной формы и при различной скорости их обтекания. В целом характер поведения гидравлического сопротивления двухрядных углублений различной формы существенно отличается от сопротивления одиночных углублений такой же формы [1].

Выводы

1. Гидравлическое сопротивление двухрядной системы “гладких” сферических углублений увеличивается с ростом их глубины, а системы квадратных (“плохообтекаемых”) углублений — уменьшается.

2. Гидравлическое сопротивление цилиндрических углублений в двухрядной системе увеличивается при $Re_{2H} < 34000$ с ростом глубины, а при $Re_{2H} > 34000$ — уменьшается.

3. Система двухрядных углублений квадратной формы глубиной $h/D = 0,20$ обладает наибольшим сопротивлением при всех числах Рейнольдса. Наименьшее сопротивление в области $Re_{2H} < 30000$ имеет система цилиндрических углублений глубиной $h/D = 0,20$, при $Re_{2H} = 30000 \dots 40000$ — двухрядная система сферических углублений глубиной $h/D = 0,20$, а в области $Re_{2H} > 40000$ — система цилиндрических

углублений глубиной $h/D = 0,30$ и сферических глубиной $h/D = 0,20$.

4. Для более глубокого понимания вихревой структуры потока в углублениях различной формы и объяснения характера поведения гидравлического сопротивления необходимы дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центро-

бежных массовых сил. Т. 5: Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. — Киев, 2005. — 500 с.

2. Кубанский П.Н. Поведение резонансной системы в потоке // Журнал технической физики. — 1957. — Т. 27, № 1. — С. 180 — 188.

Получено 23.02.2009 г.

УДК 532.542:536.252/255:621.314.212

КРУКОВСКИЙ П.Г.¹, ЯЦЕВСКИЙ В.А.¹,
КОНТОРОВИЧ Л.Н.², ИВАНКОВ В.Ф.², ЮРЧЕНКО Д.Д.¹

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²ОАО «Запорожтрансформатор»

CFD — МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КАТУШЕЧНЫХ ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ОХЛАЖДАЮЩЕГО МАСЛА

Проведено аналіз і порівняння локальних та середніх коефіцієнтів тепловіддачі у вертикальних і горизонтальних охолоджувальних каналах котушкових обмоток силових трансформаторів в умовах вільної конвекції трансформаторного масла. Результати отримано за допомогою розроблених CFD — моделей у спряженій постановці. Верифікацію моделі здійснено за експериментальними даними.

Проведён анализ и сравнение локальных и средних коэффициентов теплоотдачи в вертикальных и горизонтальных каналах охлаждения катушечных обмоток силовых трансформаторов в условиях естественной конвекции трансформаторного масла. Результаты получены с помощью разработанных CFD — моделей в сопряжённой постановке. Верификация модели проведена по экспериментальным данным.

Analysis and comparison of the local and average heat transfer coefficients in vertical and horizontal channels for the cooling of bobbin windings of power transformers under conditions of natural convection of the transformer oil have been carried out. Results have been obtained with the help of developed CFD - models in conjugate statement. The model has been verified by experimental data.

$A_{св}$ — коэффициент эмпирической зависимости;
 b — радиальная ширина обмотки;
 $b_{вн}$ — ширина внутреннего охлаждающего канала;
 $b_{н}$ — ширина наружного охлаждающего канала;
 C_p — теплоёмкость;
 D — диаметр;
 d_r — гидравлический диаметр;
 g — ускорение свободного падения;
 H — высота обмотки;
 h — высота горизонтального межкатушечного канала;

L_k — расстояние от нижнего торца обмотки до верхнего торца расчётной катушки (или витка цилиндрической обмотки);
 P — статическое давление;
 ΔP — перепад давления;
 q — плотность теплового потока;
 q_v — объёмное тепловыделение;
 Pr — число Прандтля;
 r, z, φ — координаты цилиндрической системы координат;