

ISSN 0204-3602

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

том 25

6



2003

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

Vol. 25

No 6 2003

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ  
НАН УКРАИНЫ

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ  
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год  
Основан в 1979 г.

**Том 25, № 6, 2003**

Главный редактор – Долинский А.А.

### Редакционная коллегия:

Засок Б.И. – зам. главного редактора  
Зуляндра А.Ф.  
Диденко О.И.  
Дикий Н.А.  
Домашев Е.Д.  
Слименко В.Н.  
Сондак Н.М. – ответственный секретарь  
Юсач В.Г.  
Исьменный Е.Н.  
Ллатонов В.В.  
Снежкин Ю.Ф.  
Фалко Н.М.  
Салатов А.А.  
Шурчков А.В.  
Эпик Э.Я.

### Редакционный совет:

Александров С.В. (Россия)  
Бигел У. (США)  
Блашавик Ю. (Польша)  
Борверда В.П. (Россия)  
Бонвалов В.И. (Россия)  
Бюриг Х. (Германия)  
Баджамдар А. (Канада)  
Бартыненко О.Г. (Беларусь)  
Батей И. (Румыния)  
Бизута И. (Япония)  
Бинг-Шан-Жу (Китай)  
Бокорьяков В.Е. (Россия)  
Байред Н. (Великобритания)  
Боттен Дж.Е. (США)

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Рядно А.А., Кныш Л.И.**  
Оптимизация геометрических и динамических характеристик теплоаккумулирующего модуля ..... 9
- Халатов А., Баерли А., Очоа Д.**  
Структура потока внутри и в следе за одиночной сферической и цилиндрической лункой: ламинарный режим течения ..... 15
- Иваницкий Г.К.**  
Численное исследование динамики пузырьков в явлениях акустической кавитации ..... 22
- Кузнецова С.А.**  
Моделирование тепломассообменных и гидродинамических процессов в элементах циркуляционного контура контактных газопаротурбинных установок ..... 28
- Басок Б.И., Зав'ялов В.Л., Куліненко В.Р.**  
Динаміка росту парової фази при кипінні рідин в умовах вільної конвекції ..... 34

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

- Бессараб А.С., Шутюк В.В., Ващук Т.А.**  
Метод построения гидродинамически целесообразных профилей каналов энергетических установок ..... 42
- Никитенко Н.И., Фиалко Н.М., Сороковая Н.Н.**  
Математическое моделирование теплопереноса и фазовых превращений при плазменном напылении ..... 45
- Горін В.Я., Горін В.В.**  
Розробка нових конструкцій високоефективних теплообмінників з двофазним середовищем ..... 53

### КОММУНАЛЬНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Долинский А.А., Дюков В.А., Диденко В.М., Базеев Е.Т.**  
О некоторых проблемах интеграции децентрализованного электрогенерирующего оборудования в единую систему электроснабжения Украины ..... 61

### ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

- Васильев Л.Л., Антух А.А., Васильев Л.Л. (мл), Мишкинис Д.А.**  
Ресорбционные тепловые трубы - энергосберегающая технология ..... 65
- Щедролосев А.В.**  
Снижение энергозатрат в специальных комплексах энергетических установок универсальных наливных судов ..... 71
- Рудобашта С.П., Сухер М.**  
Опреснение морской воды энергосберегающим методом мембранной дистилляции ..... 75

### ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

- Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В.**  
Преобразователи теплового потока для измерителей теплопроводности материалов ..... 84

УДК 621.438

БЕССАРАБ А.С., ШУТЮК В.В., ВАШУК Т.А.

Украинский государственный университет пищевых технологий, Киев

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ ПРОФИЛЕЙ КАНАЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Викладено метод побудови геометричної форми проточної частини каналів, яка забезпечує повільний перехід між проміжними перерізами каналу. Це зменшує нерівномірність поля швидкості в каналі і знижує аеродинамічні втрати.

Изложен метод построения геометрической формы проточной части каналов, обеспечивающей плавный переход между промежуточными сечениями канала. Это уменьшает неравномерность поля скорости в канале и снижает аэродинамические потери.

The method for construction of flowing parts of irregular shape ducts providing blend between intermediate sections of the duct is described. It helps to decrease shading error of speed in the duct and lessen aerodynamic losses.

$A$  – площадь сечения канала;  
 $L$  – расстояние вдоль оси канала;  
 $R$  – радиус равновеликого круга сечения канала;  
 $R^*$  – радиальный коэффициент формы сечения;  
 $r, \theta$  – полярные координаты;  
 $\beta$  – азимутный угол;  
 $\delta^*$  – толщина вытеснения;  
 $\varphi$  – потенциал скорости;

$\psi$  – функция тока;  
 $\rho$  – радиус-вектор.

### Индексы:

0 – сечение на входе в канал;  
 $n$  – сечение на выходе из канала;  
 $i = 0 \dots n$  – номера сечений;  
 $j$  – направление радиуса-вектора.

В теплотехнических установках широко применяются каналы и патрубки разных размеров и геометрической формы. При течении газа (жидкости) через них имеют место потери энергии, вызванные в основном отрывными явлениями и неравномерностью поля скоростей.

Пограничный слой играет основную роль в процессах динамического и термодинамического взаимодействия потока вязкой среды с поверхностью омываемого им тела. В каналах и патрубках потери энергии определяются главным образом отрывными явлениями и вызванным ими вихреобразованием. Поэтому уменьшение потерь энергии при течении газа (жидкости) возможно за счет отыскания такой формы образующих канала, при которой отрывные явления отсутствуют или сводятся к минимуму.

Метод заключается в следующем [1]. Профиль канала, построенного по данным исследования течения потенциального потока, можно на безотрывном участке течения рассматривать как некоторый условный профиль для потока вязкой жидкости, деформированный на толщину вытеснения пограничного слоя, а теоретическое распределение скорости или давления на этом профиле – как распределение

на внешнем потоке. При малой толщине  $\delta^*$  вытеснения пограничного слоя такое приближение с большой степенью точности определяет реальные характеристики системы на безотрывном участке течения. Раздельное изучение потенциального и вязкого областей течения и последующее согласование полученных результатов позволяет получить необходимую информацию о потоке в целом.

При изучении потенциального потока определяют распределение скорости на стенках канала. Эти данные используют для расчета пограничного слоя, в результате чего находят расположение области отрыва на стенках канала. Методом последовательного приближения определяют форму проточной части канала, удовлетворяющего требованиям расположения точки отрыва возможно ниже по течению.

Теоретические исследования следует дополнить экспериментальными на моделях методом оптической визуализации потока [2].

Следующий этап профилирования заключается в окончательной доводке профиля проточной части канала методом построения форм поверхностей поперечных сечений по известным их площадям.

Методы исследования течения потенциальных потоков хорошо известны (контурных интегральных соотношений, электродинамической аналогии и др.). Расчет пограничного слоя рекомендуется выполнить на основе модели плоского установившегося пограничного слоя. Поэтому остановимся на изложении методов геометрического конструирования канала.

Потери давления в канале в значительной степени вызваны неравномерностью поля скорости. В связи с этим существенным является вопрос об обеспечении плавного сопряжения различных сколь угодно малых участков канала. Этот вопрос имеет особое значение, если формы промежуточных сечений канала, например формы входного и выходного сечений, различны. Плодотворным в этом отношении является графоаналитический метод построения проточной части канала. В этом методе по заданным основным конструктивным характеристикам канала, а именно положению оси канала, форме и площади входного и выходного сечения, площади поперечных сечений, ставится задача построить проточную часть канала с плавными переходами при сколь угодно большом количестве промежуточных образующих.

График радиусов поперечных сечений можно получить из графика изменения площадей поперечных сечений путем его обратно квадратичного преобразования. В качестве преобразующего элемента целесообразно выбрать параболу с вертикальной осью. Графики изменения радиусов равновеликих сечений могут быть определены и расчетным путем.

Введем следующие обозначения:  $\rho_{ij}$  – радиус-вектор произвольного сечения по  $j$ -му лучу;  $\alpha_{ij} = K_{ij} - 1$  – радиальный коэффициент полноты сечения.

Изменяя по определенному закону  $K$  или  $\alpha$  вдоль оси канала в направлении всех лучей, получаем для любой величины  $L_i$  определенный комплекс их значений и тем самым конфигурацию промежуточных сечений канала.

Для  $K_{ij}$  рекомендуется принимать закон прямолинейного изменения. В таком случае будем иметь:

$$K_{ij} = K_{0j}[1 - (L_i/L)] + K_{nj}(L_i/L),$$

$$K_{0j} = \rho_{ij}/R_0; K_{nj} = \rho_{nj}/R_n.$$

Для каждого промежуточного сечения комплексы полярных радиусов:

$$\rho_{ij} = K_{ij} \cdot R_i.$$

С увеличением числа промежуточных сечений растет степень плавности переходов по всему каналу, следовательно, увеличивается равномерность поля скоростей.

Для построения канала с плавными переходами можно обратиться к теории плоского потенциального поля. Сущность метода состоит в следующем.

Как и в графоаналитическом методе считаются известными: форма и размеры входного и выходного

сечений канала, геометрическое место центров тяжести сечений, т.е. положение оси, и закон изменения площадей проходных сечений.

Будем исходить из того, что начальное и конечное сечения канала являются подобными и замкнуты линиями потенциала  $\varphi_0 = \text{const}$  и  $\varphi_n = \text{const}$ . Аналогично можно принять для линий тока  $\psi_0 = \text{const}$  и  $\psi_n = \text{const}$ . Промежуточные сечения строятся подобными форме эквипотенциальных линий  $\varphi_i = \text{const}$  (либо линий тока  $\psi_i = \text{const}$ ) плоскопараллельного стационарного поля, находящегося между выделенными контурами.

Закон изменения площадей сечений канала имеет вид:

$$A_i = K_i A_0, \quad (1)$$

где  $A_0$  – площадь начального сечения;  $K_i$  – множитель, учитывающий расширение (сужение) сечения канала  $0 \leq i \leq n-1$ ;  $n-1$  – число промежуточных сечений.

Потенциал скорости и функция тока в полярных координатах  $r, \theta$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi &= \left(r + \frac{1}{r}\right) \cos \theta, \\ \psi &= \left(r - \frac{1}{r}\right) \sin \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Линии тока от диполя будут лежать внутри окружности и представляют собой замкнутые кривые третьего порядка. Нулевая линия тока, соответствующая начальному сечению канала, имеет форму полуокружности. Предпоследнее сечение будет очерчиваться  $n-1$  линией тока. Последнее сечение является окружностью.

Положим, что  $\psi = C_i$ , где  $C_i$  – некоторые постоянные величины, подлежащие затем определению.

Тогда из уравнения (2) следует выражение для безразмерного радиус-вектора  $i$ -той линии тока.

$$r = \left(C_i \pm \sqrt{C_i^2 + 4 \sin^2 \theta}\right) / 2 \sin \theta. \quad (3)$$

Из анализа формулы (3) следует, что величинам  $C_i < 0$  и положительному знаку перед корнем соответствуют линии тока, лежащие внутри верхней полуокружности. При  $C_0 < 0$  получаем граничную линию  $OAB < 0$ . В пределе, когда  $C_i \rightarrow \infty$ , кривые, описываемые уравнением (3), переходят в окружности, площади которых стремятся к нулю. Безразмерная площадь  $\bar{A}_i$  промежуточного контура определяется по формуле

$$\bar{A}_i = \frac{C_i}{2} \int_0^\pi \frac{\sqrt{C_i^2 + 4 \sin^2 \theta}}{\sin \theta} d\theta + \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

На основании эллиптических интегралов первого рода выражение (4) можно представить в виде:

$$\bar{A}_i = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 - \frac{C_i^4}{8\sqrt{4+C_i^2}} \left[ 1 + \frac{3C_i^2}{4(4+C_i^2)} + \frac{5C_i^4}{32(4+C_i^2)^2} + \alpha \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – остальные члены ряда, малые по сравнению с первыми членами. Из формулы (5) следует, что для входного сечения площадь  $\bar{A}_0 = \pi/2$ .

Масштабный коэффициент для  $i$ -го контура определим из соотношения

$$\bar{A}_i = \bar{A}_0 = m_i. \quad (6)$$

Тогда из зависимости (6) с учетом (5) получим

$$m_i = \frac{1 - \frac{C_i^4}{8\sqrt{4+C_i^2}} \left[ 1 + \frac{3C_i^2}{4(4+C_i^2)} + \frac{5C_i^4}{32(4+C_i^2)^2} \right]}{\pi}. \quad (11)$$

На основе закона (1) с учетом соотношения (6) для размерного радиус-вектора  $i$ -го сечения получим формулу

$$r_i^* = r_i \sqrt{(2K_i A_0) / \pi m_i}. \quad (8)$$

Константа  $C_i$ , входящая в уравнение (3), определяется следующим образом. Сначала проводится эквипотенциаль наибольшей длины – линия ODEL (рис. 1).

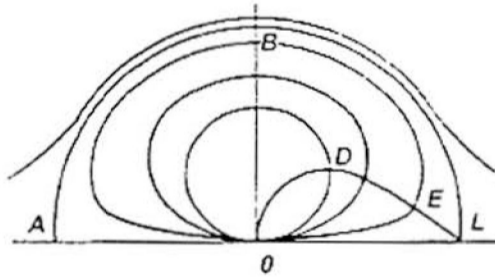


Рис. 1. Схема диполя.

Поскольку уравнения линий тока представлены в системе координат  $r, \theta$ , с целью удобства обозначений уравнение эквипотенциали ODEL запишем в новой системе координат  $\rho, \beta$  с началом в точке O:

$$\rho = (1 - \sin \beta) / \cos \beta, \quad (9)$$

где  $0 < \beta < \pi/2$ .

Разделим теперь линию ODEL на  $n$  отрезков равной длины  $\Delta l_i = h$ . Длину каждого из отрезков  $\Delta l_i$  определяем по формуле

$$h = \frac{1}{\cos^2 \beta_{i=1}} \sqrt{\cos^2 \beta_{i=1} + (1 - \sin \beta_{i=1})^2} \Delta \beta_i,$$

где  $\Delta \beta_i = \beta_i - \beta_{i-1}$ , откуда

$$\beta_i = \beta_{i-1} + \frac{h \cos^2 \beta_{i=1}}{\sqrt{\cos^2 \beta_{i=1} + (1 - \sin \beta_{i=1})^2}}. \quad (10)$$

Пусть пересечение луча  $\beta = \beta_i$  с линией ODEL происходит в точке  $D(\beta_i, \rho_i)$ . Положим  $\theta = \beta_i, r = \rho_i$ . При выбранной длине отрезка  $h$  из формулы (10) находим значение  $\beta_i$ . Учитывая, что  $\rho_i = r_i$ , из формулы (9) определяем  $r_i$ , а затем из формулы (3) величину  $C_i$ . При этом в выражение (3) вместо  $\theta$  подставляем значения  $\beta_i$ . Затем из формулы (7) определяются  $m_i$ , а из формулы (8) – величины радиус-векторов  $r_i^*$ . Полученные значения радиус-векторов используются для построения искомых контуров промежуточных сечений каналов.

Если задаются более сложные профили начального и конечного сечений, когда применение изложенного метода сопряжено с определенными трудностями математического характера, то промежуточные сечения удобно строить графически с использованием электропроводной бумаги. На листе электропроводной бумаги в выбранных масштабах сначала вычерчивают начальное и конечное сечения (рис. 2). Для удобства построения линий равного потенциала масштаб для площади конечного сечения рекомендуют выбирать в 3...5 раз меньше масштаба начального сечения канала. После этого проводят наиболее длинную линию тока АЕ, разбиваемую на отрезки равной длины, количество которых равно числу выбранных сечений канала.

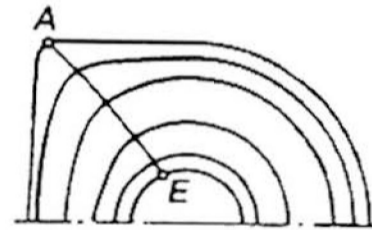


Рис. 2. Построение эквипотенциалов.

Затем методом электро моделирования наносят линии равного потенциала, проходящие через концы отрезков. Полученные замкнутые линии являются искомой формой промежуточных сечений. Планиметром определяют площадь  $A_i^*$ , ограниченную  $i$ -й эквипотенциалью. Для определения масштаба  $m_i$  используют соотношение, аналогичное соотношению (6):

$$m_i = A_i^* / A_0^*.$$

Увеличение или уменьшение проходных сечений удобно проводить с помощью пантографа, масштаб-

ный коэффициент которого равен  $\sqrt{K/m_1}$ , где, как и в формуле (1),  $K_1$  учитывает степень расширений (сужения) сечения канала.

Изложенный метод позволяет избежать ошибок на стадии проектирования и может быть использован при конструировании конфузورных и диффузорных каналов с отличающимися формами входного и выходного сечений.

#### **Выводы**

1. Разработан простой и достаточно точный метод построения формы каналов и патрубков, широко используемых в различного рода теплотехнических установках.

2. Метод позволяет рассчитывать и проектировать каналы и патрубки с малой неравномерностью поля скорости и низким аэродинамическим сопротивлением.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Драганов Б.Х., Колесников А.М. Метод профилирования патрубка, соединяющего коллектор со впускным каналом // Двигатели внутреннего сгорания. – 1980. – Вып. 32. – С. 45-50.
2. Холуер Д., Норт Р. Теневые методы в аэродинамике. – М.: Мир. 1966. – 179 с.

*Получено 05.12.2003 г.*