

УДК 532.517.3;536.79

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПЛОСКОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУИ

**А.И. Тыринов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057  
Контактный тел.: (044) 456-90-49  
E-mail: tyran@ukr.net

**Е.И. Летнянчин**

Кафедра атомных электростанций и технической теплофизики  
Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт"  
ул. Политехническая, 6, г. Киев, Украина, 03056  
Контактный тел.: (097) 670-58-04  
E-mail: Letnyanchyn@mail.ru

*Проведений чисельний аналіз гідродинамічних та теплових процесів, що відбуваються в пульсуючих імпаکتних струменях. Досліджено вплив кута нахилу, частоти та амплітуди пульсацій швидкості потоку імпаکتного пульсуючого струменя на його гідродинамічні характеристики та теплообмін*

*Ключові слова: імпактний струмінь, теплообмін, гідродинаміка, пульсація*

*Проведен численный анализ гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в пульсирующих импактных струях. Исследовано влияние угла наклона, частоты и амплитуды пульсаций скорости потока импактной пульсирующей струи на ее гидродинамические характеристики и теплообмен*

*Ключевые слова: импактная струя, теплообмен, гидродинамика, пульсация*

*This paper deals with the performing of a numeral analysis of hydrodynamic and thermal processes that take place in pulsating impinging jets. The influence of the angle of inclination, the frequency and amplitude of pulsation flow rate of the impinging jets upon hydrodynamic characteristics and heat exchange is investigated here*

*Keywords: impinging jets, heat transfer, hydrodynamics, pulsation*

## 1. Введение

Импактные струи широко используются в таких промышленных теплообменных процессах как, например, охлаждение газотурбинных лопастей и электрооборудования, сушка бумаги, текстиля, отжиг металлов. Эффективность технологии напрямую зависит от интенсивности теплообмена в подобного рода системах. Комплексное исследование теплопереноса и гидродинамики в пульсирующих струйных потоках является актуальным для нахождения и реализации оптимальных условий протекания технологических процессов при различных режимах пульсирующего течения.

## 2. Математическая модель и граничные условия

В импактной плоской струе существуют три области течения [1]: I - область свободной затопленной струи; II - область градиентного течения в зоне удара и разворота струи на преграде и область пристенной плоской струи - III (рис. 1).

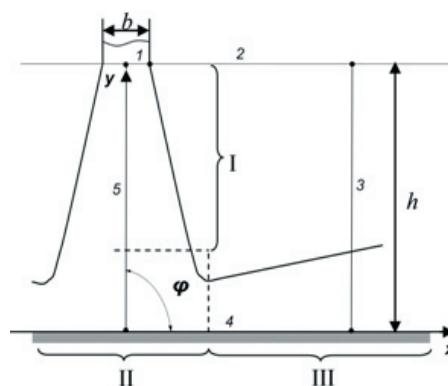


Рис. 1. Области течения импактной струи. 1...5: границы расчетной области для перпендикулярной струи

Численные исследования плоской воздушной импактной струи при угле натекания на преграду  $\phi$ , равном 90 градусов, проводились на равномерной прямоугольной сетке с шагом 0,5 мм. Окружающая среда - воздух. Для проведения расчетов применена RNG k-ε модель турбулентности. Схема расчетной области представлена на рис. 1 (ограничена линиями 1...5). При

построении расчетной области для перпендикулярной струи использована симметрия, относительно оси струи (линия 5).

Для моделирования применялась двумерная математическая модель, включающая в себя уравнения движения и неразрывности:

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} + \frac{\partial u_n u_m}{\partial x_m} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_n} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left[ (v + v_t) \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_n}{\partial x_n} = 0,$$

где  $p$  – давление;  $u$  – скорость;  $t$  – время;  $x$  – координата;  $\rho$  – плотность;

уравнение конвективного теплообмена:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (Tu_n)}{\partial x_n} = \frac{\partial}{\partial x_n} \left[ (a + a_t) \frac{\partial T}{\partial x_n} \right] \quad (2)$$

Замыкается система уравнениями для турбулентной вязкости:

$$v_t = 0,0847 \frac{k^2}{\varepsilon} = C_v \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

турбулентного числа Прандтля:

$$\left| \frac{Pr_t^{-1} - 1,3929}{Pr^{-1} - 1,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{Pr_t^{-1} + 2,3929}{Pr^{-1} + 2,3929} \right|^{0,3679} = \frac{v}{v_t}, \quad (4)$$

кинетической энергии турбулентности  $k$ :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_n \frac{\partial k}{\partial x_n} = 2v_t S_{nm}^2 - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_n} \left( \frac{v_t}{\kappa_K} \frac{\partial k}{\partial x_n} \right),$$

и скорости диссипации  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_n \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n} = 2C_{1\varepsilon} v_t \frac{\varepsilon}{k} S_{nm}^2 - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_n} \left( \frac{v_t}{\kappa_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n} \right) - R_\varepsilon, \quad (5)$$

где  $C_{1\varepsilon} = 1,42$  и  $C_{2\varepsilon} = 1,68$ ,  $R_\varepsilon = 2v_0 S_{nm} \frac{\partial u'_1}{\partial x_n} \frac{\partial u'_1}{\partial x_m}$  и  $\kappa_K = \kappa_\varepsilon$  определяется из формулы

$$\left| \frac{\kappa_K^{-1} - 1,3929}{0,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{\kappa_K^{-1} + 2,3929}{3,3929} \right|^{0,3679} = \frac{v}{v_t} \quad (6)$$

При расчетах были использованы следующие граничные условия (рис. 1):

1:  $u_y = V_0(1 + a_v \sin(2\pi ft)); u_x = 0;$

$T = 273K; k = k_0; \varepsilon = \varepsilon_0;$

2:  $p = p_{atm}; u_x = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \frac{\partial k}{\partial y} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0;$

3:  $p = p_{atm}; u_y = 0; \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \frac{\partial k}{\partial x} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0;$

4:  $u_x = u_y = 0; T = 363K; k = 0; \varepsilon = \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \Big|_{y=y_{wall}};$

5:  $u_x = 0; \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0,$

где  $V_0$  – средняя скорость,  $a_v$  – амплитуда пульсаций и  $f$  – частота пульсаций. При углах наклона струи,

отличных от 90 градусов, симметрия не использовалась и применялись граничные условия для границы 3.

### 3. Результаты моделирования

Как показали исследования, для импактных струй с углами атаки  $\varphi$ , отличными от 90 градусов, области пристенной плоской струи несимметричны. Отличается также местоположение критической точки. В перпендикулярной струе точка максимального давления совпадает с позицией пересечения оси струи с преградой, а для наклонных струй она смещена в сторону меньшего значения угла между осью струи и преградой. Это можно объяснить тем, что расходы жидкости с обеих сторон струи отличаются между собой и критическая точка смещается в сторону меньшего расхода. Расстояние, на которое происходит смещение, обратно пропорционально углу атаки импактной струи.

Наличие пульсаций дает рост значений осевой скорости. Ширина струи при наличии пульсаций уменьшается из-за роста толщины слоя смешения за счет увеличения турбулентности, обусловленного пульсациями скорости.

Влияние пульсаций на поперечные профили скорости в области свободной струи практически не зависит от значения угла атаки струи.

Результаты моделирования свидетельствуют, что в области свободной струи поперечные профили температуры автомодельны по числу Рейнольдса  $Re = bV_0 / \nu$  в исследованном диапазоне  $Re = 10^4 \dots 10^5$ , а также не зависят от наличия пульсаций скорости в диапазоне чисел Струхала  $Sh = bf / V_0 = 0,025 \dots 0,125$ .

В зоне удара и разворота (область II на рис. 1) наличие пульсаций скорости интенсифицирует теплообмен.

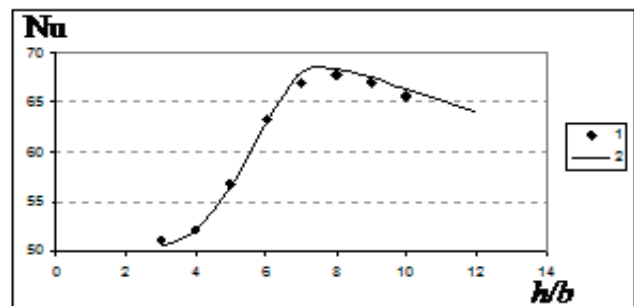


Рис. 2. Зависимость значения числа Нуссельта в критической точке от нормированного расстояния до преграды ( $Re=11000$ ): 1 - экспериментальные данные; 2 - результаты моделирования

На рис. 2 отображены результаты расчетов значений числа Нуссельта и экспериментальные данные для тех же условий [2]. Расстояние до преграды нормировано шириной сопла. Начальная интенсивность турбулентности – 0,1%. Угол наклона струи – 90 градусов. Исходя из показанного рисунка, можно отметить наличие максимума, соответствующего расстоянию  $h/b=7,5$  до преграды.

Максимальное значение числа Нуссельта в критической точке при различных числах Рейнольдса

и углах атаки зависит только от угла наклона импактной струи и не зависит от числа Рейнольдса. Это объясняется следующими причинами: при углах наклона струи меньших, чем 90°, ось струи и линия тока, разделяющая поток на две неравные части не совпадают. Расстояние между точками пересечения оси струи и разделяющей линии тока возрастает с уменьшением угла. Интенсивность турбулентности на разделяющей линии тока значительно выше, чем на оси. Поэтому, с ростом турбулентности растет и теплообмен. Эта разница сохраняется при безразмерных расстояниях до преграды  $h/b < 7,5$ . На больших расстояниях расположен участок струи, на котором турбулентность потока уже достаточно велика и практически одинакова на оси струи и разделяющей линии тока. Следовательно, на участке струи при  $h/b > 7,5$  теплообмен практически не зависит от угла наклона.

На теплообмен в области критической точки значительное влияние оказывает градиент давления. Он оказывает стабилизирующее воздействие на пристенный пограничный слой. При изменении угла наклона струи нарушается симметрия потока. При этом критическая точка смещается в сторону меньшего расхода пристенной струи. Пристенный пограничный слой здесь более турбулизирован, что и ведет к интенсификации теплообмена.

Зависимость максимального значения числа Нуссельта от угла наклона струи в диапазоне  $Re=104...105$  определяется выражением

$$\frac{Nu}{Nu_{90}^0} = -0.0316\phi^2 - 0.2807\phi + 1.521, \tag{7}$$

а зависимость смещения критической точки относительно точки пересечения оси струи с преградой от угла наклона струи в том же диапазоне чисел Рейнольдса можно выразить формулой

$$\frac{x_k}{b} = -3.056\phi + 4.8, \tag{8}$$

где  $x_k$  – смещение критической точки относительно точки пересечения оси струи с преградой.

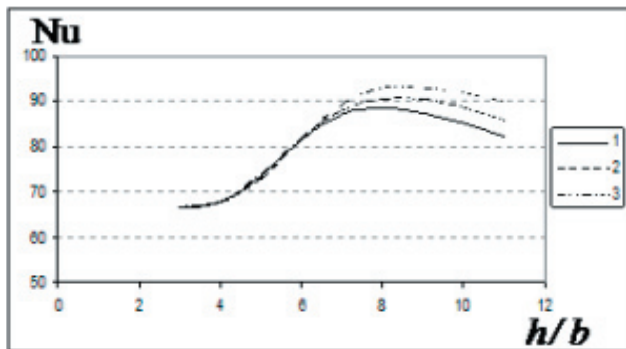


Рис. 3. Зависимости осредненного по времени числа Нуссельта в критической точке от безразмерного расстояния до преграды при различных амплитудах колебаний: 1 – без колебаний,  $Re=17115$ ; 2 –  $a_v=0,1$ ;  $Sh=0,125$ ; 3 –  $a_v=0,5$ ;  $Sh=0,125$

Для пульсирующей импактной струи существуют два участка, отличающиеся по характеру теплообме-

на. При  $h/b < 7$  теплообмен практически не зависит от наличия пульсаций скорости и их амплитуды. На большем отдалении от преграды наличие пульсаций увеличивает интенсивность теплообмена. Об этом свидетельствуют кривые 2 и 3. Причиной возрастания интенсивности теплообмена является возрастание турбулизации потока при возрастании амплитуды пульсаций скорости потока.

Зависимость максимального значения числа Нуссельта от амплитуды колебаний скорости потока в исследованном диапазоне чисел Струхала  $Sh=0,025...0,125$  можно выразить следующей формулой:

$$\frac{Nu_{max}}{Nu_{max}^0} = -0.265a_v^2 + 0.234a_v + 1, \tag{9}$$

где  $Nu_{max}^0$  – максимальное значение числа Нуссельта при отсутствии колебаний.

Зависимость безразмерного расстояния от среза сопла до точки максимального значения числа Нуссельта от амплитуды колебаний в том же диапазоне чисел Струхала описывается выражением (10).

$$\frac{h_{max}}{b} = -5.010a_v^2 + 5.534a_v + 8, \tag{10}$$

где  $h_{max}$  – расстояние от среза сопла до точки с максимальным значением числа Нуссельта.

На теплообмен в критической точке больше влияет значение амплитуды колебаний чем их частота.

Зависимость максимального значения числа Нуссельта от числа Струхала определяется формулой (11) в исследованном диапазоне амплитуд пульсаций  $a_v=0,1...0,5$

$$\frac{Nu_{max}}{Nu_{max}^0} = 20,015Sh^3 - 6,720Sh^2 + 0,758Sh + 1, \tag{11}$$

где  $Nu_{max}^0$  – максимальное значение числа Нуссельта при отсутствии колебаний.

Безразмерное расстояние от среза сопла до точки максимального значения числа Нуссельта в зависимости от числа Струхала для того же диапазона можно определить из выражения (12).

$$\frac{h_{max}}{b} = -77.770Sh^2 + 17.306Sh + 8.04, \tag{12}$$

где  $h_{max}$  – расстояние до точки с максимальным значением числа Нуссельта.

### Выводы

Проведенный численный анализ гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в пульсирующих импактных струях, показал, что изменение угла наклона струи приводит к смещению положения критической точки, а также перераспределению полей давлений и скоростей и коэффициентов теплоотдачи. С уменьшением угла наклона струи значения числа Нуссельта в критической точке возрастает при неизменном числе Рейнольдса. При уменьшении угла наклона положение точки максимума на зависимости

числа Нуссельта від безрозмірного відстання до перешкоди зміщується в сторону менших відстаней. Збільшення амплітуди пульсацій веде до зменшенню області впливу перешкоди на характеристики струї і викликає зменшення максимальних значень

швидкості в області пристінної плоскості струї. При різних комбінаціях кутів (в діапазоні 30...90 градусів), амплітуд  $a_v$  (в діапазоні 0...0,5  $V_0$ ) і частот (в діапазоні 10...50 Гц) найбільший приріст теплообміну досягав 75%.

#### Література

1. Дыбан Е.П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур – Киев : Наук. думка. – 1982. – 303 с.
2. Mladin E.C. Local convective heat transfer to submerged pulsating jets. / E.C. Mladin, D.A. Zumbrennen // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1997. – Vol. 40, – No. 14, – С. 3305–3321.
3. Юдаев Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин – М., «Машиностроение». – 1977. – 248 с.

*Представлено огляд робіт, що описують критичні режими гідродинаміки в контактних апаратах. Розглянуто процеси хвильового руху, утворення та розриву плівки, винесення рідини з плівки. Встановлено параметри, що мають вплив на ці процеси*

*Ключові слова: захливання, плівка, розрив, кут змочування*

*An overview of works describe the critical regimes of hydrodynamics in contact apparatus. Equations for calculating processes - wave creation for laminar and turbulent motion, formation and film rupture, making liquid film. Parameters that influence these processes is established*

*Key words: film, contact angle, film break, flooding*

*Представлен обзор работ, описывающих критические режимы гидродинамики в контактных аппаратах. Рассмотрены процессы волнообразования при ламинарном и турбулентном движении, образования и разрыва пленки, выноса жидкости с пленки. Установлены параметры, влияющие на эти процессы*

*Ключевые слова: захлебывание, пленка, разрыв пленки, угол смачивания*

УДК 532.546.2

# ГІДРОДИНАМІКА ПОТОКІВ В КОНТАКТНИХ АПАРАТАХ

**І.М. Кузьменко**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем

Теплоенергетичний факультет

Національного технічного університету України

”Київський політехнічний інститут”

пр. Перемоги, 37, корпус 5, кафедра АПЕПС, м. Київ,

03056

Контактний тел.: 068-375-79-43

E-mail: ozirno@ukr.net

## 1. Вступ

Відомо, що на роботу плівкових тепломасообмінних апаратів істотно впливають режими руху плівки рідини. Зокрема, за певних умов збігання рідини може відбуватися перехід від плівкового до струмкового режиму руху, що зменшує поверхню тепло-

масообміну і, відповідно, інтенсивність процесу. Це явище характеризується мінімальною густиною зрошення  $\Gamma_{\min}$  і визначає нижню межу стійкості руху плівки. Верхня межа стійкості руху плівки визначається як початок зриву крапель з поверхні плівки, або перехід до барботажного режиму в протиточних апаратах.