

УДК 536.24

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВПАДАЮЩЕЙ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА ПЛОСКОЙ СТРУЕЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

А. В. Афанасьев¹, В. В. Афанасьева¹, А. В. Хроменко¹

На основе численного решения уравнений Навье–Стокса и уравнения энергии с применением графической обработки результатов расчетов проведено исследование теплообмена и структуры течения вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости вблизи изотермического горизонтального цилиндра, обтекаемого плоской струей. Дано описание постановки задачи и численного метода ее решения. Показано хорошее соответствие между результатами вычислительного и натурального экспериментов. Выявлены зависимости структуры течения и интенсивности теплообмена от определяющих параметров.

1. Введение. Настоящая работа посвящена численному исследованию обтекания горизонтального изотермического цилиндра плоской струей вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости.

Практическое применение струйного охлаждения в промышленности разнообразно: сушка текстиля и бумаги, охлаждение заготовок из металла и стекла, тепловое регулирование в электронике и т.д. Актуальность данной задачи связана с возрастающей потребностью в технологии охлаждения микрочипов и “тепловых трубок”, находящихся внутри портативных электронных устройств (персональных компьютеров). Широкое применение в данной области нашли именно ламинарные струи [1], так как они обеспечивают практически пассивное тепловое регулирование и позволяют экономить заряд батареи. Со все возрастающим ростом мощностей компьютеров использование струйного охлаждения предоставляет возможность добиваться эффективного охлаждения, не увеличивая габариты электронных устройств (компьютеров).

В настоящее время хорошо изучены задача о поведении затопленной струи жидкости, взаимодействующей с неподвижной средой, и задача о натекании струи жидкости на пластину [2, 3]. Задача о взаимодействии струи с телами различной формы изучена в недостаточной мере, хотя представляет несомненный интерес, в частности, когда обтекаемое тело является круговым цилиндром.

При изучении обтекания кругового цилиндра струей жидкости можно воспользоваться результатами, полученными ранее при решении задачи об обтекании цилиндра бесконечным потоком жидкости [4–6]; эта задача является частным случаем струйного обтекания при условии, что ширина струи много больше диаметра цилиндра.

2. Постановка задачи. Рассматривается двумерная задача о ламинарном обтекании цилиндра плоской струей жидкости (рис. 1). На горизонтальный изотермический цилиндр (диаметр которого D , а температура поверхности T_w) из сопла шириной H натекает струя жидкости, температура которой на срезе сопла постоянна (T_f , $T_f < T_w$). Расстояние от среза сопла до цилиндра равно h . Профиль скорости на срезе сопла прямоугольный. Скорость V истечения жидкости из сопла предполагается дозвуковой. Цилиндр находится в начальном участке струи, т.е. $h < 4H$ [2]; ширина сопла не превосходит радиуса цилиндра $H < 0.5 D$.

В основу модели положены уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска с переходом к функции тока (Ψ) и функции интенсивности вихря (ω), а также уравнение энергии.

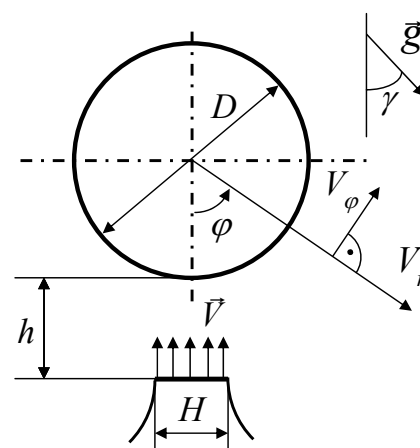


Рис. 1. Расчетная схема

¹ Московский государственный университет леса, факультет механической и химической технологии древесины, 1-я Институтская ул., д. 1, 141005, Московская обл., г. Мытищи; e-mail: afanasev@mgul.ac.ru

Использовалась полярная система координат со сгущением расчетной сетки у цилиндра с помощью преобразования $\xi = e^{-kr}$, где $k = \text{const}$ — параметр сгущения.

Определяющими параметрами являются: $\text{Re} = \frac{VD}{\nu}$ — число Рейнольдса, $\text{Gr} = g \beta \Delta T \frac{D^3}{\nu^2}$ — число Грасгофа, $\text{Ri} = \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2}$ — число Ричардсона, $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ — число Прандтля, $\frac{H}{D}$ — отношение ширины сопла к диаметру цилиндра, $\frac{h}{H}$ — отношение расстояния от среза сопла до цилиндра к ширине сопла.

Уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{\tau}} - k \bar{\xi} \bar{V}_r \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{\xi}} - \frac{k}{\ln \bar{\xi}} \bar{V}_\varphi \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varphi} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{k^2}{\ln \bar{\xi}} \left[\bar{\xi} \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left(\bar{\xi} \ln \bar{\xi} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{\xi}} \right) + \frac{1}{\ln \bar{\xi}} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \varphi^2} \right]. \quad (1)$$

Уравнение переноса импульса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{\tau}} - k \bar{\xi} \bar{V}_r \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{\xi}} - k \frac{\bar{V}_\varphi}{\ln \bar{\xi}} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \varphi} = & - \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \frac{k}{\ln \bar{\xi}} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi} (\bar{T} \cos(\varphi - \gamma)) + \bar{\xi} \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} (\ln \bar{\xi} \bar{T} \sin(\varphi - \gamma)) \right] + \\ & + \frac{1}{\text{Re}} \frac{k^2}{\ln \bar{\xi}} \left[\bar{\xi} \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left(\bar{\xi} \ln \bar{\xi} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{\xi}} \right) + \frac{1}{\ln \bar{\xi}} \frac{\partial^2 \bar{\omega}}{\partial \varphi^2} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{V}_r = -\frac{k}{\ln \bar{\xi}} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \varphi}$ — безразмерная радиальная составляющая скорости и $\bar{V}_\varphi = k \bar{\xi} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{\xi}}$ — безразмерная тангенциальная составляющая скорости.

Уравнение, связывающее безразмерную функцию интенсивности вихря с безразмерной функцией тока, имеет вид

$$\bar{\omega} = -\frac{k^2}{\ln \bar{\xi}} \left[\bar{\xi} \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \left(\bar{\xi} \ln \bar{\xi} \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial \bar{\xi}} \right) + \frac{1}{\ln \bar{\xi}} \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial \varphi^2} \right]. \quad (3)$$

Граничные условия для системы уравнений ставились следующим образом. Условия прилипания заданы на цилиндре: $\bar{T} = \bar{T}_w = 1$; $\bar{\Psi} = 0$; $\bar{V}_r = 0$; $\bar{V}_\varphi = 0$, а также на внешних стенках сопла: $\bar{T} = \bar{T}_f = 0$; $\bar{\Psi} = \text{const}$; $\bar{V}_r = 0$; $\bar{V}_\varphi = 0$. На срезе сопла заданы безвихревое течение и равномерное распределение скорости: $\bar{T} = \bar{T}_f = 0$; $\bar{\Psi} = \frac{1}{k} \ln \bar{\xi}_1 \sin \varphi$ (в физическом эксперименте подобные условия можно получить с помощью сопла Витушинского); $\bar{\omega}$ определяется на границе из уравнения (3) с учетом сказанного выше.

На внешней границе заданы условия полной проницаемости: $\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{\xi}} = 0$; $\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \bar{\xi}} = 0$; $\frac{\partial \bar{V}_r}{\partial \bar{\xi}} = 0$; $\frac{\partial \bar{V}_\varphi}{\partial \bar{\xi}} = 0$.

Начальные условия: $\bar{T} = \bar{T}_w = 1$ на поверхности цилиндра, во всей расчетной области $\bar{T} = \bar{T}_f = 0$; на срезе сопла задано равномерное распределение скорости, во всей остальной расчетной области — задано течение, соответствующее безотрывному обтеканию цилиндра струей идеальной жидкости конечной ширины. Безразмерные переменные введены следующим образом (безразмерные величины отмечены чертой сверху): $\tau = \frac{D}{V} \bar{\tau}$; $\Psi = VD \bar{\Psi}$; $\omega = \frac{V}{D} \bar{\omega}$; $V_r = V \bar{V}_r$; $V_\varphi = V \bar{V}_\varphi$; $T = \Delta T \bar{T} + T_f$, где D — диаметр цилиндра, V — модуль скорости на срезе сопла, T_f — температура струи на срезе сопла и ΔT — разность температуры цилиндра и температуры струи на срезе сопла.

Здесь использовались обозначения: Ψ — функция тока; ω — интенсивность вихря; V_r — радиальная компонента скорости; V_φ — тангенциальная компонента скорости; T — температура; τ — время; ξ — координата в радиальном направлении; φ — координата в тангенциальном направлении; γ — угол между вектором ускорения свободного падения и вектором скорости на срезе сопла.

3. Метод численного решения. Задача решалась конечно-разностным методом. Для перехода от системы дифференциальных уравнений и краевых условий к соответствующим конечно-разностным

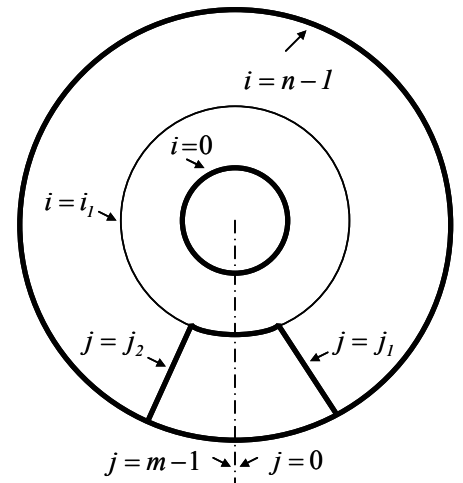


Рис. 2. Схема расположения узлов сетки в координатах $\bar{\xi}, \varphi$

соотношениям рассматриваемая область изменения безразмерных координат $(\bar{\xi}, \varphi)$ была заменена равномерной сеткой узловых точек с номерами i, j , которые изменялись в диапазонах $0 \leq i \leq n - 1$ и $0 \leq j \leq m - 1$ (рис. 2). Сетка задавалась как $(n; l \times m)$, где n и m — количество всех узлов в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно, а l — количество узлов, приходящихся на сопло, в радиальном направлении. Параметр сетки k выбирался следующим образом: $k = -\frac{1}{h/D} \ln(l/n)$.

Безразмерный шаг между узловыми точками в радиальном направлении $\Delta\bar{\xi} = \frac{\bar{\xi}^0}{n}$, где $\bar{\xi}^0 = e^{-k/2}$, а в тангенциальном направлении $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{m-1}$ (с учетом того, что значения функций при $\varphi = 0$ ($j = 0$) и $\varphi = 2\pi$ ($j = m - 1$) хранились в разных ячейках памяти).

Безразмерное время протекания процесса было разбито на конечные интервалы. Величина шага по времени $\Delta\tau_q$ зависела от номера временного слоя и определялась из условий практической устойчивости [7].

Аппроксимация конечными разностями дифференциальных уравнений (1) и (2) проводилась по модифицированной явной схеме, ориентированной “против потока”, с компенсацией погрешности первого порядка [7].

Для одномерного модельного уравнения переноса $\frac{\partial T}{\partial t} = -U \frac{\partial T}{\partial x} + a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ приведем пример конечно-разностного шаблона выбранной схемы для узла сетки с номером i :

$$\frac{T_i^* - T_i}{\Delta\tau} = (|U_i| - U_i) \frac{T_{i+1} - T_i}{2\Delta x} - (|U_i| + U_i) \frac{T_i - T_{i-1}}{2\Delta x} + a \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \left[\left| 1 - |U_i| \frac{\Delta x}{2a} \right| + \left(1 - |U_i| \frac{\Delta x}{2a} \right) \right],$$

где T_i^* — значение температуры в узле сетки с номером i на новом временном шаге. Эта схема неоднократно использовалась для решения задач естественной конвекции около горизонтального цилиндра и подробно описана в работах [7, 8].

Для аппроксимации составляющих скорости использовались конечные разности второго порядка.

Уравнение (3) решалось методом установления по неявной схеме с использованием продольно-поперечных прогонок. По тангенциальной координате использовалась циклическая прогонка [9].

На основе этого алгоритма авторами разработана и реализована программа численного счета на языке программирования C++.

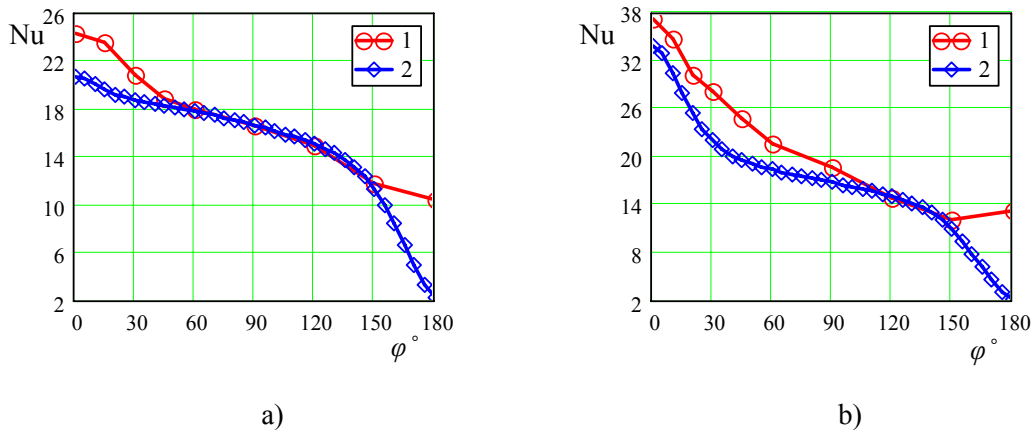


Рис. 3. Сравнение с физическим экспериментом при $Gr = 2.5 \cdot 10^6$, $Pr = 0.7$, $H = 0.262 D$, $h = 2H$:
 1 — физический эксперимент [11]; 2 — вычислительный эксперимент настоящей работы;
 а) $Re = 169$, $Ri = 88.532$; б) $Re = 712$, $Ri = 4.931$

Программа предоставляет пользователю возможность ввода исходных данных (таких как физические параметры жидкости, диаметр цилиндра, ширина среза сопла, расстояние от среза сопла до цилиндра, температура поверхности цилиндра, скорость на срезе сопла) и задания параметров расчетной области. В ходе вычислительного эксперимента с помощью графического представления результатов расчетов можно наблюдать нестационарные картины течения и полей температур.

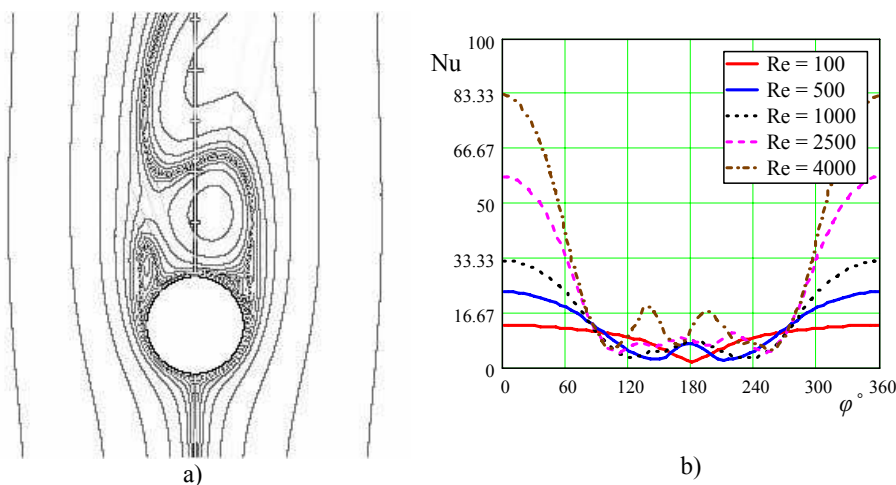


Рис. 4. Обтекание цилиндра бесконечным потоком: а) картина течения для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 2500$, $Ri = 0.04$, $Pr = 0.7$; б) распределение локальных чисел Nu для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 100 \div 4000$, $Ri = 0.0156 \div 25$, $Pr = 0.7$

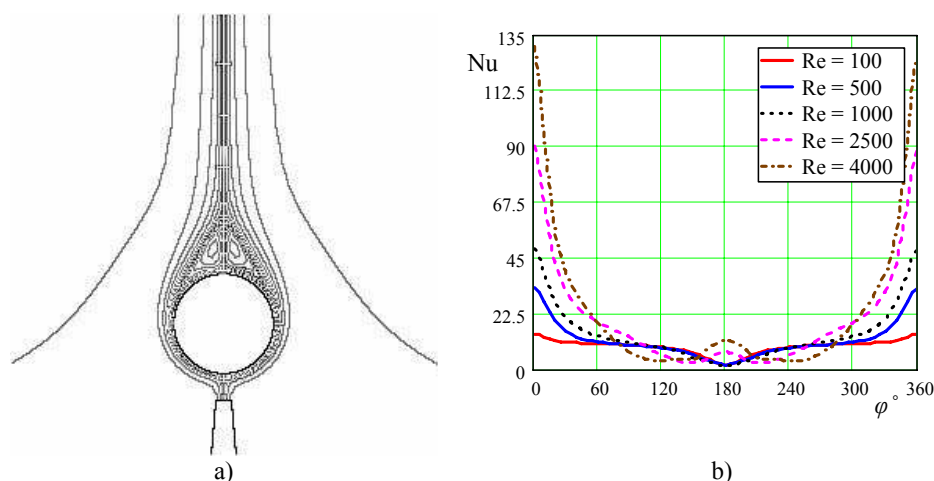


Рис. 5. Струйное обтекание цилиндра при $H = 0.131 D$, $h = 2H$: а) картина течения для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 2500$, $Ri = 0.04$, $Pr = 0.7$; б) распределение локальных чисел Nu для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 100 \div 4000$, $Ri = 0.0156 \div 25$, $Pr = 0.7$

Разработанная программа позволяет получить информацию о распределении температуры и скорости в области расчета, а также значения среднего и локального теплообмена на цилиндре. Значение числа Нуссельта на поверхности цилиндра вычислялось по формуле $Nu = k \bar{\xi}^0 \left. \frac{\partial T}{\partial \xi} \right|_{\bar{\xi}=\bar{\xi}^0}$ с использованием трехточечной схемы второго порядка.

4. Обсуждение результатов расчетов. Как показано в [10], распределение скорости на срезе сопла, определяемое формой кромки сопла, существенно влияет на теплообмен и гидродинамику. Мы рассматривали случай равномерного распределения скорости на срезе сопла, что соответствовало физическому эксперименту [11]. Все расчеты проводились для случая совпадающей смешанной конвекции, т.е. $\gamma = 0$. Были выполнены методические расчеты по определению параметров сетки (чисел n , l , m), таких, чтобы условия на внешней границе расчетной области не оказывали существенного влияния на процессы в окрестности цилиндра.

Авторами были проведены вычислительные эксперименты с входными параметрами, соответствующими входным параметрам физических экспериментов [11]; результаты сопоставлений полей температур и локального теплообмена приведены в работе [12]. Следует отметить удовлетворительное согласование результатов вычислительных и натурных экспериментов. На рис. 3 приведено сравнение значений локальных чисел Nu по данным вычислительного и физического экспериментов. Имеются расхождения в

лобовой и кормовой зонах. Возможно, это связано с тем, что измерения в лабораторных экспериментах проводились зондовым методом, а это в свою очередь могло отразиться на гидродинамике и теплообмене, особенно в кормовой зоне, где происходит формирование теплового факела.

Результаты, представленные в настоящей работе, получены для следующих постоянных параметров задачи: $\gamma = 0$, $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Pr = 0.7$. Остальные определяющие параметры изменялись согласно таблице.

На рис. 4 а–7 а иллюстрируется влияние отношения ширины сопла H к диаметру цилиндра D на структуру течения вблизи цилиндра. Для всех расчетов, представленных на этих рисунках, выбраны следующие числа подобия:

$$Gr = 2.5 \cdot 10^5; \quad Re = 2500; \quad Pr = 0.7.$$

На рис. 4 а представлена картина течения при обтекании цилиндра бесконечным потоком, за цилиндром образуется дорожка Кармана. При струйном обтекании картина течения существенно зависит от отношения ширины сопла к диаметру цилиндра при $h = 2H$ (рис. 5 а–7 а).

При малой относительной ширине струи (рис. 5 а и 6 а) за цилиндром образуются симметричные вихри, при больших величинах вихри периодически отрываются от поверхности цилиндра, образуя вихревую дорожку (рис. 7 а).

Определяющие параметры задачи

	Re	Ri	H/D	h/H	сетка
1	100	25	0.131	2	(140; 110 × 73)
2	100	25	0.262	1	(140; 110 × 73)
3	100	25	0.262	2	(140; 90 × 73)
4	100	25	0.394	2	(140; 77 × 73)
5	100	25	бесконечный поток		(140; 90 × 73)
6	500	1	0.131	2	(140; 110 × 73)
7	500	1	0.262	1	(140; 110 × 73)
8	500	1	0.262	2	(140; 90 × 73)
9	500	1	0.394	2	(140; 77 × 73)
10	500	1	бесконечный поток		(140; 90 × 73)
11	1000	0.25	0.131	2	(140; 110 × 73)
12	1000	0.25	0.262	1	(140; 110 × 73)
13	1000	0.25	0.262	2	(140; 90 × 73)
14	1000	0.25	0.394	2	(140; 77 × 73)
15	1000	0.25	бесконечный поток		(140; 90 × 73)
16	2500	0.04	0.131	2	(140; 110 × 73)
17	2500	0.04	0.262	1	(140; 110 × 73)
18	2500	0.04	0.262	2	(140; 90 × 73)
19	2500	0.04	0.394	2	(140; 77 × 73)
20	2500	0.04	бесконечный поток		(140; 90 × 73)
21	4000	0.0156	0.131	2	(140; 110 × 73)
22	4000	0.0156	0.262	1	(140; 110 × 73)
23	4000	0.0156	0.262	2	(140; 90 × 73)
24	4000	0.0156	0.394	2	(140; 77 × 73)
25	4000	0.0156	бесконечный поток		(140; 90 × 73)

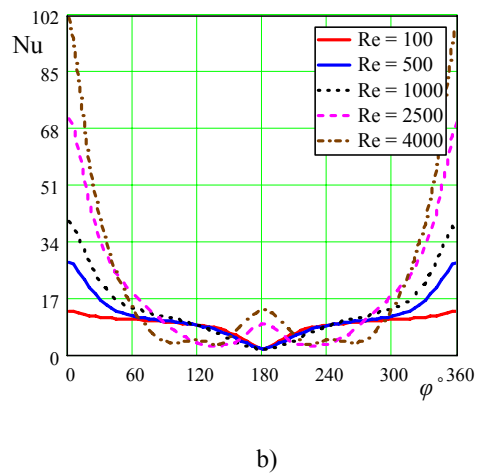
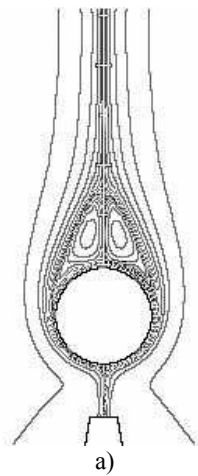


Рис. 6. Струйное обтекание цилиндра при $H = 0.262 D$, $h = 2H$: а) картина течения для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 2500$, $Ri = 0.04$, $Pr = 0.7$; б) распределение локальных чисел Nu для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 100 \div 4000$, $Ri = 0.0156 \div 25$, $Pr = 0.7$

Распределения локальных чисел Nu представлены на рис. 4 б–7 б. В случаях, когда за цилиндром происходит отрыв вихрей, распределение локальных чисел Nu в кормовой зоне до угла отрыва нарушает свою симметрию относительно вертикальной оси. Отметим, что максимальное значение числа Nu , которое достигается в лобовой точке, практически линейно зависит от числа Re .

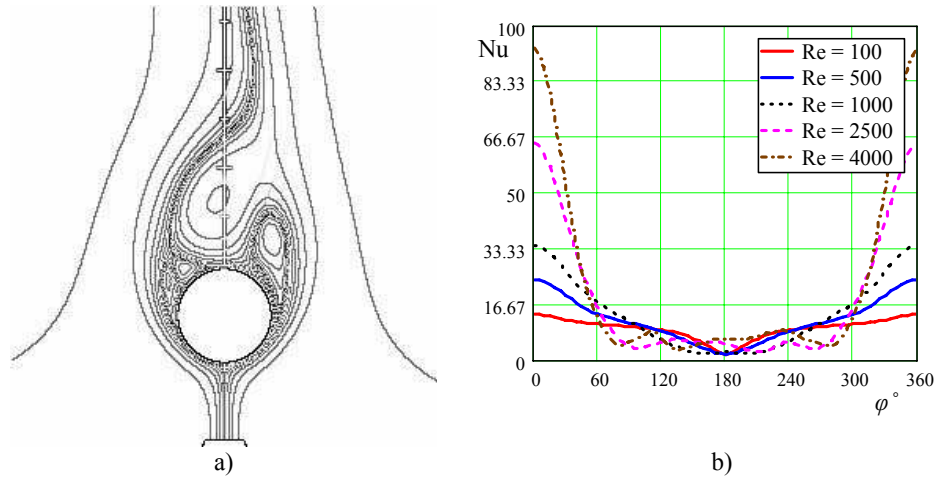


Рис. 7. Струйное обтекание цилиндра при $H = 0.394 D$, $h = 2H$: а) картина течения для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 2500$, $Ri = 0.04$, $Pr = 0.7$; б) распределение локальных чисел Nu для параметров $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 100 \div 4000$, $Ri = 0.0156 \div 25$, $Pr = 0.7$

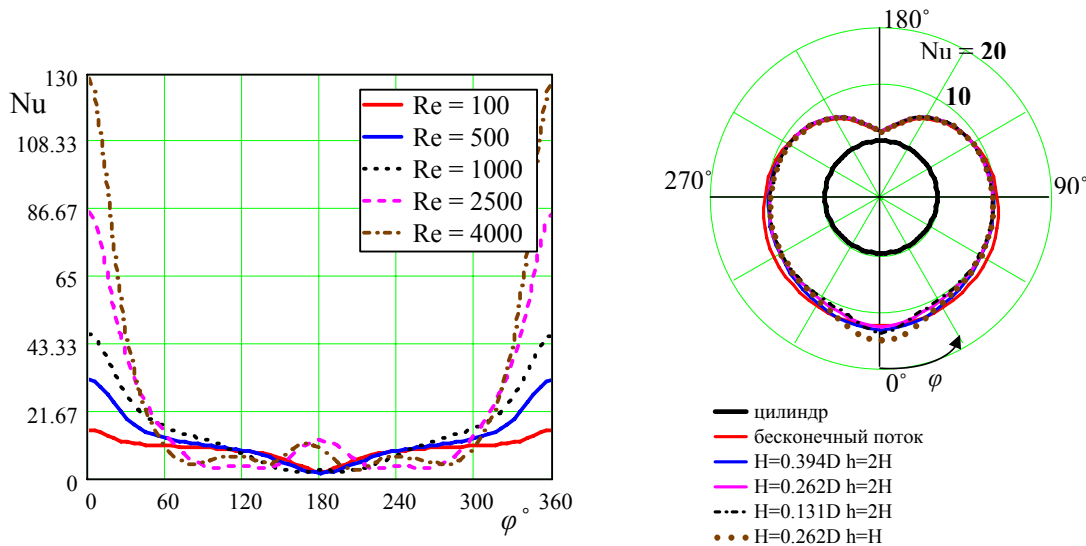


Рис. 8. Распределения локальных чисел Nu для параметров $H = 0.262 D$, $h = H$, $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 100 \div 4000$, $Ri = 0.0156 \div 25$, $Pr = 0.7$

Рис. 9. Распределения локальных чисел Nu при струйном обтекании цилиндра для $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 100$, $Ri = 25$, $Pr = 0.7$ в зависимости от отношений H/D и h/H

Случай, когда расстояние от среза сопла до цилиндра постоянно ($h = 0.262 D$), а изменялась лишь ширина сопла, представлен на рис. 5 б) и 8. Из анализа графиков зависимости локальных чисел Nu от тангенциальной координаты следует, что значение числа Nu в лобовой точке при изменении ширины сопла вдвое практически не меняется.

На рис. 9–13 отображены данные по локальному теплообмену при постоянном значении числа Re для различных отношений H/D и h/H .

Заметим, что между видом течения вблизи цилиндра и распределением локального теплообмена существует зависимость. Стационарное течение характеризуется тем, что симметрия распределения локальных чисел Нуссельта относительно вертикальной оси сохраняется. С появлением за цилиндром вихревой дорожки распределение Nu изменяется со временем и симметрия относительно вертикальной оси нарушается. Безотрывному обтеканию соответствует единственный минимум локального теплообмена на угле 180° .

На рис. 9 представлены данные по локальному теплообмену для $Re = 100$. Образование вихрей за цилиндром не наблюдается для всех рассмотренных случаев, преобладает естественная конвекция и течение стационарно.

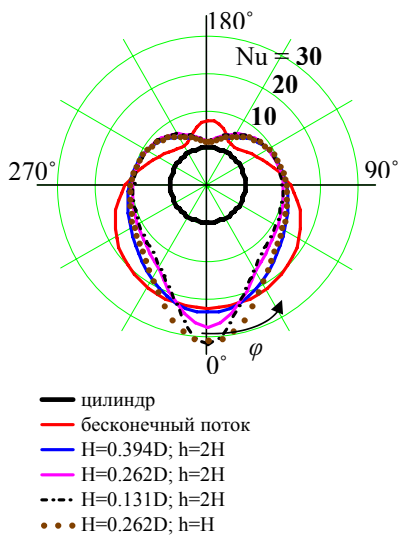


Рис. 10. Распределения локальных чисел Nu при струйном обтекании цилиндра для $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 500$, $Ri = 1$, $Pr = 0.7$ в зависимости от отношений H/D и h/H

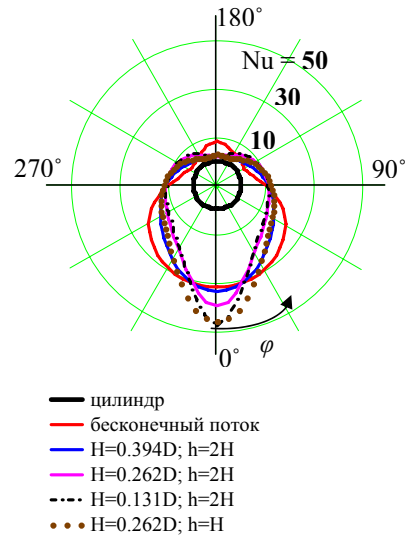


Рис. 11. Распределения локальных чисел Nu при струйном обтекании цилиндра для $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 1000$, $Ri = 0.25$, $Pr = 0.7$ в зависимости от отношений H/D и h/H

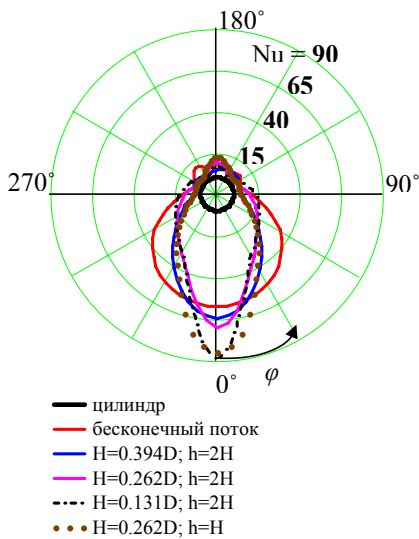


Рис. 12. Распределения локальных чисел Nu при струйном обтекании цилиндра для $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 2500$, $Ri = 0.04$, $Pr = 0.7$ в зависимости от отношений H/D и h/H

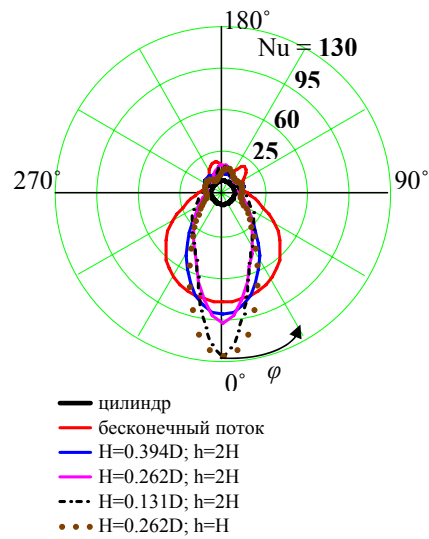


Рис. 13. Распределения локальных чисел Nu при струйном обтекании цилиндра для $Gr = 2.5 \cdot 10^5$, $Re = 4000$, $Ri = 0.0156$, $Pr = 0.7$ в зависимости от отношений H/D и h/H

При числе $Re = 500$ (рис. 10) для случая обтекания цилиндра бесконечным потоком в кормовой области происходит образование двух симметричных вихрей, а в случае струйного обтекания вихри за цилиндром не образуются и течение стационарно.

Для больших значений числа Re ($Re = 1000 \div 4000$) при обтекании цилиндра бесконечным потоком в кормовой зоне образуется дорожка Кармана.

При струйном обтекании для $Re = 1000$ течение стационарное и за цилиндром образуются два симметричных вихря (рис. 11). Для $Re = 2500$ (рис. 12) картина течения зависит от отношений H/D и h/H . При $H = 0.131D$ и $H = 0.262D$ за цилиндром образуются два симметричных вихря, а при $H = 0.394D$ вихри за цилиндром периодически отрываются.

На рис. 13 представлены зависимости локальных чисел Nu от отношений H/D и h/H для $Re = 4000$. Для струйного течения при $H = 0.131D$ за цилиндром образуются два симметричных вихря, а при $H = 0.262D$ и $H = 0.394D$ вихри за цилиндром отрываются, образуя дорожку Кармана.

Таким образом, ширина сопла существенно влияет на режим течения — появление вихрей за цилиндром и последующий их отрыв. Уменьшая отношение ширины струи к диаметру цилиндра, в некоторых случаях можно добиться безотрывного обтекания.

5. Заключение. В работе описана математическая модель и метод численного решения задачи о взаимодействии плоской струи с горизонтальным круговым цилиндром. Авторами разработана и реализована программа проведения вычислительных экспериментов, которая позволяет исследовать теплообмен и гидродинамику при струйном обтекании цилиндра. Визуализация результатов вычислительных экспериментов дает возможность наблюдать, как изменяются структура течения и тепловой след за цилиндром в зависимости от определяющих параметров задачи. Выполнено сопоставление данных вычислительных и физических экспериментов по локальному теплообмену, показано их удовлетворительное согласование.

Рассмотренный метод решения задачи об обтекании цилиндра струей жидкости можно применить и к случаю взаимодействия струи с цилиндром в замкнутом объеме или при наличии преград.

Результаты вычислительных экспериментов, а именно данные по локальному теплообмену, могут быть использованы при проектировании портативных компьютеров с целью оптимизации теплового регулирования.

Авторы выражают благодарность проф. А. В. Королькову за ценные указания и внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guarino J.R., Manno V.P.* Characterization of laminar jet impingement cooling in portable computer applications // Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. San Jose (California, USA), 2001 (<http://www.rostenaward.org/manno1.pdf>).
2. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984.
3. *Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К.* Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977.
4. *Хроменко А.В.* Гидродинамика и теплообмен горизонтального цилиндра при ламинарной смешанной конвекции: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1990.
5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
6. *Roshko A.* On the development of turbulent wakes from vortex streets. Report 1191. California Institute of Technology. Pasadena (California, USA), 1954.
7. *Купцова В.С.* Численные методы исследования процессов тепло- и массопереноса. Уч. пособие. Ч. 2. М.: МЛТИ, 1976.
8. *Корольков А.В., Купцова В.С., Малинин В.Г.* Численное исследование сопряженного теплообмена в горизонтальном цилиндре, окруженном бесконечным твердым массивом. Научн. тр. Вып. 130. М.: МЛТИ, 1981.
9. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978.
10. *McDaniel C.S., Webb B.W.* Slot jet impingement heat transfer from circular cylinders // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2000. N 43. 1975–1985.
11. *Беляков В.А., Хроменко А.В., Парыгин К.Э., Климов В.О.* Гидродинамика и теплообмен горизонтального цилиндра в плоской турбулентной струе в режиме смешанной конвекции. Научн. тр. Вып. 319. М.: Изд-во МГУЛеса, 2003.
12. *Афанасьев А.В., Афанасьева В.В.* Расчет гидродинамики и теплообмена при струйном обтекании цилиндра // Труды IV Российской Национальной Конференции по Теплообмену (РНКТ-4). Т. 2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. М.: Изд-во МЭИ, 2006. 50–53.

Поступила в редакцию
22.01.2007