

функция, которая при $y \leq L_0$ равна расстоянию от обтекаемой поверхности, а при $y > L_0$ равна единице и скруглена при помощи параболы вблизи точки $y = L_0$.

Расчеты были проведены при $u_\infty' / U_0 = 0.0245$ и $Re_L = L_0 U_0 / \nu = 500$. Для выяснения влияния интенсивности турбулентности набегающего потока на теплообмен была проведена серия расчетов при различных u_∞' / U_0 . Результаты этой серии показали, что в турбулентной области течения в слое степень турбулентности набегающего потока очень слабо влияет на значение числа S . Она влияет только на положение места перехода. При $u_\infty' / U_0 = 0.0245$ точка перехода расположена на расстоянии $\xi = 0.12$.

При интегрировании системы уравнений значения средней скорости на границе пограничного слоя и температуры стенки вычислялись из таблиц по формулам линейной интерполяции. Таблицы составлялись на основе графиков, приведенных в [3], с постоянным шагом $\Delta \xi = 0.02$.

На печать выдавались рассчитанные значения местного числа Стантона и координаты ξ .

Необходимое для вычисления числа Стантона значение местного теплового потока вычислялось после интегрирования системы уравнений методом сеток на ЭВМ по значению производной $\partial T / \partial y$ при $y = 0$. Значение производной температуры при $y = 0$ вычислялось по рассчитанным значениям температуры в первых двух точках сетки.

Значения полученного в расчетах числа $10^3 S$ представлены на фиг. 1 и 2 кривыми 2. В зонах пограничного слоя, где тепловые потоки были измерены, расчетные и измеренные значения чисел Стантона совпадают с точностью $10 \div 15\%$.

Автор благодарен Г. И. Петрову, Г. С. Глушко и Л. А. Чудову за полезные советы и обсуждение.

Поступило 29 XII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко Г. С. Некоторые особенности турбулентных течений несжимаемой жидкости с поперечным сдвигом. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 4.
2. Глушко Г. С., Солопов В. А. Процесс переноса тепла в турбулентных течениях. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 4.
3. Moretti P. M., Kays W. M. Heat transfer to a turbulent boundary layer with varying free-stream velocity and varying surface temperature — an experimental study. Internat. J. Heat and Mass Transfer, 1965, vol. 8, No. 9.

УДК 532.529

ГИДРОДИНАМИКА ГАЗО-ЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ С ВНУТРЕННИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ЦИЛИНДРОМ

А. Г. БЕЙНУСОВ, А. Н. ХОЗЕ

(Новосибирск)

Рассматривается один из возможных способов организации воздушно-испарительного охлаждения [1] в кольцевых каналах с внутренним вращающимся цилиндром. При этом на поверхность внутреннего цилиндра смачиванием наносится жидкостная пленка при осевом направлении скорости воздушного потока. Выполненные эксперименты, визуальные наблюдения и киносъемка процесса показали, что поверхность пленки остается невозмущенной и имеет ламинарный характер течения. При этом число Рейнольдса для пленки $R' < 15$ [2]. В ядре газового потока при некотором значении угловой скорости ω , возникает неустойчивость в виде вихрей Тейлора с осью вращения, перпендикулярной оси коаксиальных цилиндров [3].

Здесь изучалось ламинарное течение «тонких» пленок с гладкой поверхностью раздела фаз при безвихревом и вихревом течениях ядра газо-жидкостного потока. Вследствие аксиальной симметрии течения и малой толщины пленки по сравнению с радиусом внутреннего цилиндра задача рассматривается как одномерная [4]. Используя цилиндрическую систему координат, имеем

$$\partial w' / \partial r \gg \partial w' / \partial z, \quad \partial p / \partial r = 0 \quad (1)$$

Пренебрегая, по известным соображениям [4], кориолисовой силой, уравнение движения вязкой несжимаемой пленки жидкости в случае квазистационарного течения записывается в виде

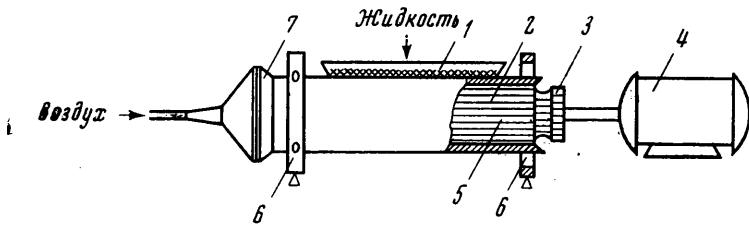
$$\mu' d^2 w' / dr^2 + \mu' / r dw' / dr = \rho' (\omega^2 r_0 + g) - \sigma / r_0 h \quad (2)$$

Здесь w' — скорость течения жидкостной пленки, μ' — коэффициент динамической вязкости жидкой фазы, ρ' — плотность жидкой фазы, ω — угловая скорость вращения цилиндра, r_0 — радиус внутреннего цилиндра, g — ускорение свободного падения, σ — коэффициент поверхностного натяжения, h — толщина пленки.

Решение (2) рассматривается при граничных условиях

$$\begin{aligned} r = r_0, \quad w' &= 0 \\ r = r_0 + h, \quad \mu' dw' / dr &= \xi'' \rho'' w_0''^2 / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ξ'' — коэффициент трения воздуха о поверхность пленки, ρ'' — плотность воздуха, w_0'' — приведенная скорость воздуха в канале.



Фиг. 1

Приняв в качестве масштабов приведения для линейных величин ширину кольцевого зазора b , для скорости пленки — приведенную скорость газового потока w_0'' , получим

$$H = h / b = f(R'', T, W, v' / v'', b / r) \quad (4)$$

Здесь R'' — критерий Рейнольдса газовой фазы, T — критерий Тейлора, W — критерий Вебера.

$$R'' \equiv \frac{2w_0'' b}{v''}, \quad T \equiv \frac{\omega^2 r b^3}{v''^2}, \quad W \equiv \frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'') 4b^2}$$

При экспериментах в качестве тяжелой фазы использовались: вода, водные растворы глицерина, олеата натрия и водоспиртовые растворы; легкая фаза — воздух. Эксперименты выполнены при адиабатических и неадиабатических условиях. Также проведены специальные эксперименты для установления влияния смачиваемости и шероховатости внутреннего цилиндра.

На фиг. 1 дана принципиальная схема экспериментальной установки. Вращающийся цилиндр 5 выполнен в виде трубы из стеклоткани с толщиной стенок 2 мм, на которой крепится нагревательная обмотка 2, изготовленная печатным способом. Проводники обмотки медного прямоугольного сечения 2×0.35 мм². К боковой поверхности проводника припаиваются головки медь-константановых термпар, которые выводятся на съемные кольца и через щеточный контакт подключаются к потенциометру ПП-63. Пазы между проводниками заполнялись эпоксидной смолой с добавкой медной стружки.

Для фиксации толщин и формы пленки на вращающемся цилиндре заподлицо с его поверхностью расположены датчики, работающие по принципу электропроводности. Датчики выполнены в виде двух медных электродов диаметром 0.2 мм, установленных на расстоянии 2 мм друг от друга. Головки датчиков расположены на изолирующей подложке из фосфат-цемента и защищены от воздействия оксидных пленок лужением. В теле цилиндра размещены сорок датчиков по пяти эквидистантным винтовым линиям. Электроды датчиков через внутреннюю полость цилиндра подключаются к коллекторному коммутатору. Специальная измерительная схема, использующая коллекторную и электронную коммутацию, позволяет обобщить информацию отдельных датчиков, обеспечивая высокое быстродействие при фиксации мгновенных эпюр толщины пленки на поверхности цилиндра.

Внутренний цилиндр крепится на двух стальных втулках, одна из которых посажена на вал по прессовой посадке, другая — по скользящей на случай осевого расширения цилиндра при нагреве. Подобное исполнение дает возможность получить экспериментальный участок с различными геометрическими характеристиками, применяя втулки и цилиндры различных диаметров.

В экспериментах рассмотрены кольцевые каналы с внутренним диаметром 87—92 мм и наружным диаметром 88—97 мм, шириной кольцевого зазора 1—10 мм, длиной обогреваемой части 395 мм.

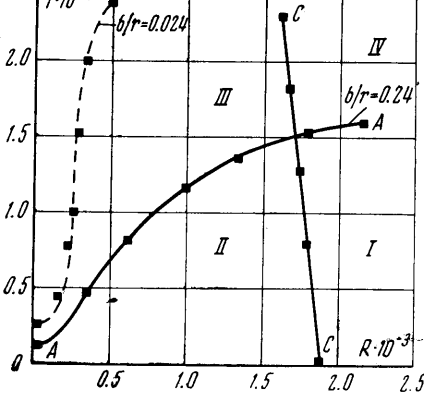
Точная регулировка величины зазора осуществлялась с помощью двух центровочных колец *b* и восьми установочных винтов. После сборки экспериментального участка все соединения и щели были тщательно уплотнены и испытаны на утечки.

Для уменьшения концевых потерь торцы цилиндра заглушены текстолитовыми дисками. Электрическая энергия на нагревательную обмотку подается через силовой коллектор *З* от сварочного трансформатора. После сборки цилиндра вращающийся элемент протачивался и полировался на станке, что позволило получить поверхность внутренней стенки кольцевого канала с относительной шероховатостью 10^{-4} .

Внешний неподвижный цилиндр выполнен из светонепроницаемого материала (стеклотекстолит или сталь), на котором сделана щель для установки поролонового валика *1*, смазывающего поверхность вращающегося цилиндра.

По образующей наружного цилиндра расположены штуцера для отбора статического давления. Применение специальных компенсационных баллончиков обеспечило значительную инерционность системы отбора и позволило измерить потери на трение с достаточной точностью.

Воздух в канал подавался от компрессора через успокоительную емкость и конфузорный вход *6* (осевой ввод газа). Расход воздуха измерялся ротаметром РС-5. Расход жидкости определялся весовым методом и контролировался ротаметром РС-3. Внутренний цилиндр приводился во вращение двигателем постоянного тока *4*. Скорость вращения измерялась строботачетом СТ-5.



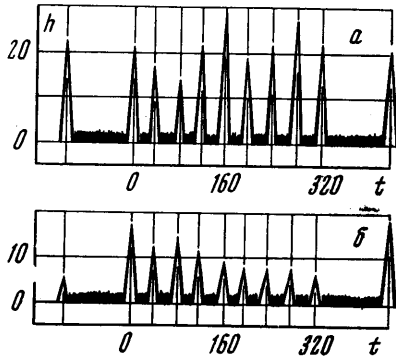
Фиг. 3

Установив зависимости для H_0 и T_0 и используя результаты экспериментов при $\omega \neq 0$, получим

$$H / H_0 = (1 - T_* / T_0)^{0.6} \quad (7)$$

Здесь $T_* = T / \Phi$ — модифицированное число Тейлора.

Формулы (5)–(7) справедливы при $0 \leq T \leq 35 \cdot 10^3$, $10^2 \leq R'' \leq 3 \cdot 10^3$, $12 \cdot 10^{-1} \leq W \leq 36 \cdot 10^{-1}$, $7 \cdot 10^{-2} \leq v' / v'' \leq 3 \cdot 10^{-1}$, $24 \cdot 10^{-3} \leq b / r \leq 24 \cdot 10^{-2}$.



Фиг. 2

На фиг. 2 показаны примеры разверток осциллограмм толщин пленки жидкости по длине окружности внутреннего цилиндра (через 40°) для произвольного поперечного сечения при адиабатических (*a*) и неадиабатических (*б*) условиях.

Безразмерную толщину пленки определяем, используя результаты экспериментов при адиабатических условиях. При $\omega = 0$ имеем

$$H_0 = 0.54(R'')^{-0.4}W^{0.6} \quad (5)$$

При некотором числе T_0 толщина жидкостной пленки становится весьма малой (меньше 2—4 мк) и можно условно предположить, что $H \approx 0$.

В рассматриваемых случаях T_0 равен

$$T_0 = T / (1 - \Phi) \approx 1.64 \cdot 10^9 \quad (6)$$

где Φ — геометрический фактор, определяемый по [5].

При неадиабатических условиях и средней температуре стенки внутреннего цилиндра $t \geq 60^\circ \text{C}$ в верхней его части, подходящей к участку жидкостной подпитки, появляются небольшие сухие зоны, площадь которых увеличивается с ростом температуры. Образовавшиеся сухие зоны после участка подпитки пронизаны большим количеством ручьев стекающей жидкости; последнее соответствует появлению на осциллограммах периодических всплесков. При $t > (80-85)^\circ \text{C}$ толщина стекающих ручьев уменьшается и они частично разрушаются. При дальнейшем увеличении температуры возникают кризисные явления, характеризующиеся резким повышением температуры стенки цилиндра.

Для установления границ перехода от безвихревого к течению ядра газо-жидкостного потока с вихрями Тейлора измерялось гидравлическое сопротивление кольцевого канала. По характеру изменения гидравлического сопротивления согласно [3, 5] получена карта режимов течения ядра потока, изображенная на фиг. 3.

На фигуре кривая $A-A$ изображает границу перехода от ламинарного (безвихревого) к ламинарному течению с вихрями Тейлора при $b/r = 0.024$. Аналогичная зависимость при $b/r = 0.24$ изображена пунктирной линией. Для установления перехода от ламинарного течения к турбулентному проведены эксперименты, которые обобщены кривой $C-C$.

Выполненные авторами тепловые эксперименты подтвердили возможность использования для расчета теплообмена в областях III и IV зависимостей, предложенных в [6].

Для оценки влияния состояния твердой поверхности вращающегося цилиндра на ней создавались шероховатости. Измерителем служил двойной микроскоп Линника с объективами ОС 39-ОС 41. В процессе экспериментов на поверхность внутреннего цилиндра наносился слой гидрофильного вещества (асбестовая бумага), а затем пленка сохранялась в результате окисления поверхности. В итоге получена зависимость безразмерной толщины пленки на вращающемся цилиндре от его шероховатости.

В экспериментальном исследовании была также выполнена визуализация и фототграфирование структур течения газо-жидкостного потока в кольцевом канале (как это сделано в [3]) и областей устойчивого существования жидкостного покрытия вращающегося цилиндра.

Поступило 3 V 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Хозе А. Н. Исследование теплоотводящих систем и утилизация низкопотенциального тепла. Научн. исслед. Новосибирск. электротехн. ин-та, Новосибирск, 1967.
2. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газо-жидкостных систем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
3. Финатьев Ю. П., Леонов Е. Г. О гидравлическом сопротивлении и структуре течения газо-жидкостной смеси в кольцевом канале с внутренним вращающимся цилиндром. В сб. «Мир глазами молодого ученого», Сер. физ., матем., механ., М., «Наука», 1968.
4. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред. М., Госэнергоиздат, 1968.
5. Кауа I., Elgar E. C. Modes of adiabatic and diabatic fluid flow in an annulus with an inner rotating cylinder. Trans. ASME, 1958, vol. 80.
6. Зыкина-Моложен Л. М., Поляк М. П. Теплообмен при турбулентном течении в кольцевых каналах с внутренним вращающимся цилиндром. Теплоэнергетика, 1970, № 5.

УДК 533.06.011

ОБТЕКАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ДВУГРАННОГО УГЛА (КОНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ)

Н. Ф. ВОРОБЬЕВ, В. П. ФЕДОСОВ

(Новосибирск)

В рамках линейной теории рассматривается обтекание сверхзвуковым потоком пересекающихся плоских крыльев, образующих двугранный угол $\pi \leq \gamma \leq 2\pi$. Получены формулы для давления в зоне взаимодействия. Рассмотрено влияние нелинейности граничных условий на участке дифракции головной характеристической поверхности на параметры течения в окрестности ребра двугранного угла.