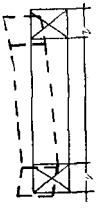




Продолжение таблицы

| Но-<br>мер<br>схе-<br>мы | Параметры,<br>вводимые<br>в программу             | Распреде-<br>ление<br>влажностн<br>по срубам | Схема деформации<br>верхнего венца сруба  | Перемещения точек, мм |        |         |        |         |        |         |        |         |       |         |       |         |        |         |        |
|--------------------------|---|--|---|-----------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|
|                          |   |  |   | А                     |        | Б       |        | Б       |        | В       |        | Г       |       |         |       |         |        |         |        |
|                          |   |  |   | x                     | z      | x       | z      | x       | z      | x       | z      | x       | z     |         |       |         |        |         |        |
| 5                        | $E, P_1, P_2,$<br>$K_{\text{нов.}}/K_{\text{ст}}$ | 30/12/30                                     |  | -11,52                | 118,94 | -8,47   | 112,77 | -10,20  | 121,02 | -6,77   | 128,48 | -134,31 | -2,28 | -134,31 | -0,42 | -125,99 | 113,49 | -122,94 | 123,65 |
| 6                        | $E, P_1, P_2, K_{\text{нов.}}$                    | 12/12/30                                     |  | -125,17               | -2,00  | -125,17 | -0,42  | -125,99 | 113,49 | -122,94 | 123,65 | -134,31 | -2,28 | -134,31 | -0,42 | -125,99 | 113,49 | -122,94 | 123,65 |
| 7                        | $E, P_1, P_2, K_{\text{ст}}$                      | 12/12/30                                     |  | -134,31               | -2,28  | -134,31 | -0,42  | -135,23 | 121,61 | -131,80 | 132,79 | -134,31 | -2,28 | -134,31 | -0,42 | -135,23 | 121,61 | -131,80 | 132,79 |

происходит в основном за счет увеличения разбухания (усушки) в тангенциальном направлении.

При изменении температурно-влажностных условий эксплуатации выявлены существенные деформации высоких срубных сооружений. Величина этих деформаций в случае использования старой или новой древесины различна. При одновременном использовании старой и новой древесины происходит неравномерная деформация сруба, что ведет к существенному отклонению оси сооружения от вертикали. Наибольшая величина деформаций наблюдается при одностороннем увлажнении.

Деформации деревянных конструкций приводят к периодическому возникновению значительных по величине дополнительных внутренних напряжений, опасному перенапряжению отдельных элементов (бревен), что может привести к образованию радиальных трещин по их длине, обмятию врубок, ослаблению соединений, выкалыванию древесины во врубках и выпусках. Эти трещины способствуют накоплению осадков, что, в свою очередь, ведет к образованию новых трещин и, в конечном итоге, существенно снижает срок эксплуатации сооружения.

В рассмотренном объекте несколько лет назад были выполнены мероприятия конструктивного характера, которые позволили снизить риск возникновения неблагоприятных воздействий, а выполненные нами расчеты подтвердили необходимость и целесообразность усиления конструкций.

УДК 536.244.45

*Э. Н. САБУРОВ, Т. Г. ЗАГОСКИНА*



Сабуров Эдуард Николаевич родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники, проректор по научной работе Архангельского государственного технического университета, член-корреспондент Российской и Международной инженерных академий. Имеет 263 печатных труда в области аэродинамики и конвективного теплообмена в сильно закрученных потоках, их использования для интенсификации процессов теплообмена в аппаратах различного технологического назначения.



Загоскина Татьяна Григорьевна родилась в 1946 г., окончила в 1970 г. Архангельский лесотехнический институт, учебный мастер кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет 16 печатных работ и изобретений.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ЦИКЛОННЫХ КАМЕР**

Приведены результаты численного решения задачи о движении газа в периферийной зоне рабочего объема циклонных камер; результаты решения сопоставлены с опытными данными.

Results of numeric solving a problem of gas flow in the peripheral zone of the operating space of cyclone chambers have been presented. Those results are compared with the empirical data.

Циклонные камеры находят успешное применение в качестве сушильных устройств в целлюлозно-бумажной, гидролизной и деревообрабатывающей промышленности [6]. Это определяется высокой интенсивностью протекания процессов тепломассообмена в их рабочем объеме и возможностью организовать процесс сушки одновременно с сепарацией высушенного продукта.

Целью настоящего исследования явилось изучение гидродинамики потока у боковой поверхности циклонной камеры, которая в конечном счете определяет условия конвективного теплообмена и эффективность работы сушильного устройства.

Исследование выполнено на двух циклонных камерах с внутренним диаметром рабочего объема  $D_k = 201$  мм. Поверхность рабочего объема камер технически гладкостенная.

Корпус первой камеры имел закручиватель длиной 135 мм и цилиндрическую часть, состоящую из плотно соединяющихся друг с другом колец шириной 80 мм, благодаря которым безразмерную (относительную) длину рабочего объема  $\bar{L}_k = L_k/D_k$  изменяли от 0,75 до 2,94. Ввод газа в рабочий объем осуществляли с двух диаметрально противоположных сторон тангенциальными шлицами. Установкой специальных вкладышей варьировали их относительную высоту  $\bar{h}_{вх} = h_{вх}/D_k$  от  $2,49 \cdot 10^{-2}$  до  $9,95 \cdot 10^{-2}$  и суммарную площадь входа  $\bar{f}_{вх} = 4 f_{вх}/\pi D^2$  от  $1,42 \cdot 10^{-2}$  до  $8,52 \cdot 10^{-2}$ . Поверхность вкладышей тщательно подгоняли так, чтобы она совпала с профилем внутренней поверхности рабочего объема. Условия входа изменяли таким образом, чтобы сохранялось неизменным расстояние от ближайшего торца камеры до оси шлица или входящей в камеру струи.

Вторую камеру использовали главным образом для проведения опытов по изучению распределения поверхностного трения. Она имеет закручиватель длиной 85 мм. Проходное сечение шлицев  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. Параметры  $\bar{f}_{вх}$  и  $\bar{h}_{вх}$  также варьировали вкладышами соответственно в диапазонах  $(2,02 \dots 10,14) \cdot 10^{-2}$  и  $(3,98 \dots 19,90) \cdot 10^{-2}$ .

Ввод газа в рабочий объем камер осуществляли с двух диаметрально противоположных сторон в одной поперечной плоскости, вывод — через соосное с рабочим объемом выходное отверстие, относительный диаметр которого  $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k$  изменяли перестановкой диафрагм от 0,3 до 0,6.

Скорости и давления в рабочем объеме моделей определяли цилиндрическими зондами с диаметром насадка 2,6 мм. Для исследования скорости потока в пограничном слое использовали специальные трехканальные микротрубки. Прямоугольное приемное отверстие центрального канала трубки имело наружные и внутренние размеры соответственно по высоте и ширине 0,39 и 1,30; 0,20 и 1,23 мм. Боковые каналы скошены под углом 60°. Форма державки микротрубок обеспечивала совпадение осей вращения насадка и центрального отверстия, профиль хоботка трубок, выполненный по специальному шаблону — плотное прилегание приемной части (носика) к поверхности рабочего объема. Крепление зонда имело электрическую изоляцию от общей массы установки. Отсчет радиального расстояния центра отверстия трубки от стенки производили с момента размыкания контакта (носик трубки — поверхность рабочего объема) электрической цепи, который фиксировался прибором ТЛ-4, включенным на максимальную чувствительность.

В качестве вторичного прибора для исследования скоростей потока в пограничном слое применяли микроманометр компенсационный с микрометрическим винтом типа МКВ-250. Исследование распределения температур производили микротермопарой, в качестве вторичного прибора при этом использовали потенциометр Р-363-1.

Перемещение зондов осуществляли координатниками, точность определения угла вектора полной скорости по отношению к горизонтали составляла  $0,5^\circ$ , точность перемещения в радиальном направлении —  $0,025$  мм.

Относительная погрешность измерения расхода воздуха дроссельными приборами  $\pm 1,94$  %. Дроссельные приборы предварительно тарировали методом определения расхода по полю скорости, снятому трубкой полного напора. Расхождение в величинах расходов, определенных двумя способами, не превышало  $0,5 \dots 1,5$  %. Относительные погрешности в определении скоростей и давлений потока в основном диапазоне их значений и средних температур с учетом относительных ошибок в определении тарировочных коэффициентов цилиндрических зондов соответственно не более  $\pm 4,6$  и  $\pm 6,0$  %.

Измерение поверхностного трения на боковой поверхности камер осуществляли по методу Престона [3]. В работе использовали трубки Пито с наружным диаметром  $0,812$  мм и отношением внутреннего диаметра к наружному, близким  $0,6$ . Трубки Пито изготовляли из медицинский инъекционных игл и тщательно отбирали с помощью микроскопа МБС-2 при 8-кратном увеличении. При изготовлении трубок уделяли особое внимание постоянству толщины стенки и наличию заусениц у приемного отверстия, соблюдению отношения внутреннего диаметра к наружному, перпендикулярности плоскости сечения отверстия к оси трубки. С помощью шаблонов трубкам придавали форму, обеспечивающую плотное их прилегание к поверхности камеры. Длина носика трубки Пито  $20$  мм. На расстоянии  $15$  мм от ее приемного отверстия сверлили дренажное отверстие диаметром  $0,5$  мм для отбора статического давления. Число трубок на поверхности рабочего объема камеры принимали из соображений надежности получаемых распределений напряжения поверхностного трения. В качестве прибора, регистрирующего разность полного давления, которое фиксируется поверхностной трубкой Пито, и статического давления, использовали микроманометр типа МКВ-250.

Результаты экспериментального исследования позволяют выявить общие закономерности циклонного потока в периферийной области рабочего объема циклонных камер.

Периферийная зона течения ограничена с одной стороны осесимметричным ядром потока, с другой — боковой поверхностью камеры. Следуя [6], схему течения газов в этой зоне можно представить в виде своеобразного турбулентного струйного потока, ограниченного спутным осесимметричным вращающимся ядром с неизменными по длине радиусом  $r_0$  и скоростью на границе  $v_0$ . В общем случае распространение потока происходит по винтообразной траектории под влиянием продольного и поперечного градиентов давления.

Вошедшая в камеру струя, совершив примерно пол-оборота в плоскости ввода до кромки диаметрально противоположного шлица, отклоняется от нее и распространяется далее по направлению к торцу камеры с постоянным углом закручивания. Осевая асимметрия потока, весьма существенная во входном сечении, исчезает практически сразу же ниже его на основном участке течения, для которого угол закручивания сохраняет постоянное значение, примерно равное  $18^\circ$ .

Как и для обычной пристеночной струи, для рассматриваемого закрученного струйного потока можно выделить начальный (или входной)

и основной участки. Однако в отличие от обычного представления о начальном участке, который характеризуется наличием ядра постоянной скорости, равной скорости истечения струи из сопла, величина начального (или входного) участка в данном случае определяется состоянием, на котором происходит перестройка распределения скорости от приобретенного в плоском канале до типичного для периферийной зоны циклонной камеры рассматриваемой геометрии.

В исследованном диапазоне геометрических характеристик камеры длина входного участка  $x_{вх}$  (рис. 1), как было установлено в опытах, в общем случае зависит от соотношения скоростей  $v_0/v_{вх} \doteq m_0$  ( $v_{вх}$  — средняя скорость потока в шлицах), являющегося аналогом параметра спутности (параметр спутности ядра циклонного потока). Течение на входном участке отличается большой сложностью. Распределение скорости на выходе из шлица зависит от характера течения как внутри, так и вне его. Причем распределение скорости потока в шлице значительно зависит от изменения по радиусу рабочего объема статического давления и общей схемы движения вращающихся в нем газов. Выходящая из шлицев, имеющих профилированную поверхность рабочего объема срез, деформированная струя взаимодействует с одной стороны с твердой стенкой камеры, с другой — с уже вращающимся в камере потоком, который имеет отличные величину и направление скорости.

В зависимости от геометрии камеры, в первую очередь от значения  $\bar{F}_{вх}$ , на выходе из шлица может иметь место как расширение, так и сужение струи. Учитывая сложность течения на входном участке, а также его сравнительно небольшую протяженность, в работе он характеризуется лишь эмпирическими уравнениями для расчета параметров течения в его конечном сечении. Основное внимание в статье уделено следующему за ним основному участку.

Для анализа течения координату  $x$  (начало координат совместим со срезом входного шлица) направим вдоль поверхности камеры,  $y$  — нормально к ней (рис. 1). Течение в струйном потоке разделим на два слоя: пристеночный пограничный (толщина  $\delta$ ) и струйный ( $\delta_0$ ).

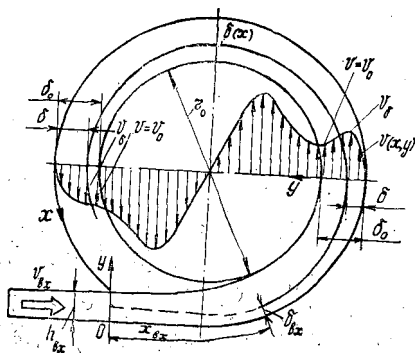


Рис. 1. Схема движения потока в периферийной области циклонной камеры

Уравнения плоского турбулентного пограничного слоя несжимаемого газа на криволинейной вогнутой поверхности с постоянным радиусом продольной кривизны  $R$  [10] запишем в виде

$$\rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( 1 - \frac{y}{R} \right) v_x \right] = - \frac{\partial P_c}{\partial x} + \left( 1 - \frac{y}{R} \right) \frac{\partial \tau}{\partial y} - \frac{2\tau}{R}; \quad (1)$$

$$\frac{\rho v_x^2}{R \left( 1 - \frac{y}{R} \right)} = \frac{\partial P_c}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left(1 - \frac{y}{R}\right) v_y \right] = 0, \quad (3)$$

где

$\rho$  — плотность потока;  
 $v_x, v_y$  — продольная и поперечная составляющие полной скорости потока;  
 $P_c$  — статическое давление;  
 $\tau$  — напряжение трения.

Опыты показали, что поперечная составляющая скорости намного меньше продольной, т. е.  $v_y \ll v_x$ . Это обстоятельство учтено при формулировке граничных условий задачи:

$$\left. \begin{aligned} y=0; \quad v_x=v_y=0; \quad \tau=\tau_w; \\ y=\delta; \quad v_x=v_\delta; \quad \tau=0; \\ y=\delta_0; \quad v_x=v_0; \quad \tau=0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\tau_w$  — напряжение трения на боковой поверхности камеры.

Радиус продольной кривизны поверхности или нулевой линии тока может быть рассчитан по общеизвестной формуле кривизны винтовой линии.

Уравнение (1) преобразуем с помощью (2), (3) и затем проинтегрируем по  $y$  от 0 до  $\delta$  и  $\delta_0$ . В результате интегрирования (с учетом граничных условий) и приведения к безразмерному виду (в качестве масштабных величин приняты  $r_0$  и  $v_0$ ), а также дополнительной оценки порядка членов получим два интегральных соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} - \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right) d\bar{y} - \\ - \frac{1}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} + \frac{\bar{\delta}}{R} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \\ + \frac{\bar{\delta}}{R} \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} - \frac{\bar{\delta}}{R-\bar{\delta}} \frac{d\bar{\delta}}{dx} = -\frac{c_f}{2}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \\ + \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta^2} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} - \\ - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} = -\frac{c_f}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $c_f = 2\tau_w/\rho v_0^2$  — коэффициент сопротивления трения.

При обтекании плоской поверхности малой кривизны ( $R \rightarrow \infty$ ) потенциальным потоком ( $v_\delta = v_0$ ) уравнения (5), (6) переходят в общеизвестные интегральные соотношения [10]. Система уравнений (5), (6) не является замкнутой, поскольку содержит пять неизвестных величин:  $\delta, \delta_0, v_\delta, v_0$  и  $\tau_w$ .

Напряжение поверхностного трения можно определить по полученным опытным данным. На рис. 2 они представлены в виде зависимости коэффициента сопротивления трения  $c_f$  от числа Рейнольдса  $Re_\delta = v_0 \delta / \nu$ .

Установлено, что следует различать два вида зависимостей  $c_f(Re_\delta)$ :

для камер с относительно небольшой  $\bar{f}_{вх} = (1,42 \dots 4,26) \cdot 10^{-2}$  и  $m_0 < 1$

$$c_f = 0,011 Re_\delta^{-2/15} \bar{f}_{вх}^{-0,0176}; \quad (7)$$

$$c_f = 0,0182 Re_\delta^{-2/15} m_0^{-0,304}; \quad (8)$$

для камер с  $\bar{f}_{вх} > 4,26 \cdot 10^{-2}$  и  $m_0 > 1$

$$c_f = 0,0018 Re_\delta^{-2/15} \bar{f}_{вх}^{-0,84}; \quad (9)$$

$$c_f = 0,021 Re_\delta^{-2/15} m_0^{-1,91}. \quad (10)$$

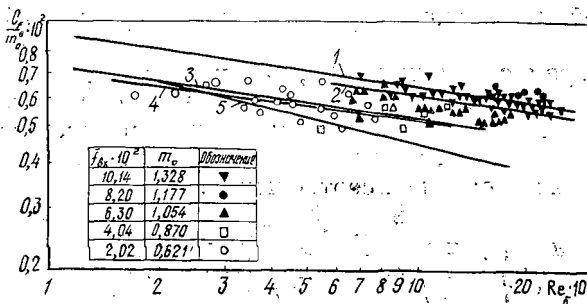


Рис. 2. Зависимости коэффициента сопротивления трения от числа  $Re_\delta$ , полученные на основании результатов работ [8] (1); [7] (3); [2] (5) и формул (10) — кривая 2 и (8) — кривая 4

Отклонение опытных точек от обобщающих кривых не превышает  $\pm 12\%$ . Формулы (7) — (10) справедливы при  $Re_\delta = (2,6 \dots 13,0) \cdot 10^3$ .

На рис. 2 приведено сопоставление формул (8) и (10) с опытными данными авторов, известными уравнениями для пластины и трубы [2], пластины при ее струйном обтекании [8] и циклонной камеры с периферийным выводом газов [7].

Постоянные для определенных условий  $\delta_0 = R_k - r_0$  и  $v_0$  могут быть определены по рекомендациям [4, 5].

В области пристенного пограничного слоя опытные распределения продольной компоненты скорости потока (фактически, как отмечалось выше, полной скорости) хорошо обобщаются степенной зависимостью (рис. 3, а)

$$\bar{v} = \frac{v}{v_\delta} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^n = \bar{y}^n, \quad (11)$$

а в струйной части пристенного пограничного слоя (рис. 3, б) — формулой Абрамовича — Шлихтинга [8]:

$$\bar{w} = \frac{v - v_0}{v_\delta - v_0} = \left[1 - \left(\frac{y - \delta}{\delta_0 - \delta}\right)^{3/2}\right]^2 = (1 - \bar{\eta}^{3/2})^2. \quad (12)$$

При этом интегральные соотношения (5), (6) после подстановки (8) — (12) и выполнения интегрирования представлены в виде двух дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\bar{\delta}}{dx} \left[ \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{n+1} - \frac{\bar{\delta}}{R} \left( 0,316 + 0,269 \frac{v_0}{v_\delta} + 0,416 \left(\frac{v_0}{v_\delta}\right)^2 \right) \right] =$$

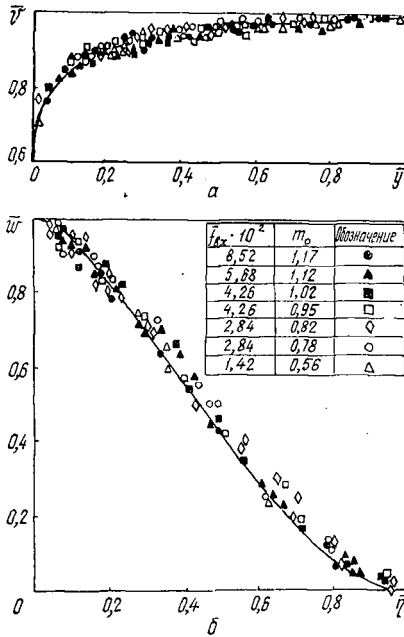


Рис. 3 Аппроксимация опытного распределения скорости с помощью степенной зависимости (а) и формулы Абрамовича — Шлихтинга [8] (б)

$$-\frac{\bar{\delta}}{\bar{R}-\bar{\delta}} + \frac{1}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{d\bar{x}} \left[ \bar{\delta} \left( \frac{2}{2n+1} - \frac{1}{n+1} \right) + \frac{\bar{\delta}}{\bar{R}} (\bar{\delta} - \bar{\delta}_0) \left( 0,632 + 0,269 \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \right) \right] = -\frac{c_f}{2}; \quad (13)$$

$$\frac{d\bar{\delta}}{d\bar{x}} \left[ \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{n+1} \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} - 0,316 + 0,181 \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} + 0,134 \left( \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \right)^2 \right] + \frac{1}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{d\bar{x}} \left[ \frac{2}{2n+1} \bar{\delta} - \frac{\bar{\delta}}{n+1} \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} + (\bar{\delta}_0 - \bar{\delta}) \times \left( 0,632 - 0,181 \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \right) \right] = -\frac{c_f}{2}. \quad (14)$$

Большая часть опытных профилей  $\bar{v}$ , относящихся к основному (расчетному) участку, имеет  $n$ , близкие к 1/14. Именно это значение взято в качестве расчетного. (В дальнейшем, вероятно, целесообразно попытаться установить зависимость  $n(x)$ ).

Некоторые результаты численного решения уравнений (13), (14) в диапазоне варьирования  $\bar{R}$ ,  $Re_\delta$ ,  $m_0$ , близких к опытным, приведены в табл. 1—3.

Они показывают, что с увеличением числа  $Re_\delta$  толщина пристенного пограничного слоя  $\bar{\delta}$  убывает, скорость на границе  $\bar{v}_\delta$  возрастает. Но влияние  $Re_\delta$  на эти величины незначительно. Увеличение радиуса кривизны поверхности приводит к возрастанию  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_\delta$ . Характер влияния  $m_0$  на  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_\delta$  является обратно пропорциональным.

По результатам численного решения уравнений получены формулы для расчета толщины пристенного пограничного слоя и скорости на его границе:



Таблица 1

Значения  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_s$  при различных  $\bar{R}$  и  $\bar{x}$  ( $Re_s = 15 \cdot 10^3$ ,  $m_0 = 0,4$ )

| $\bar{R}$ | $\bar{x}$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | 6         | 8      | 10     | 12     | 14     | 16     | 18     | 20     | 22     | 24     | 26     |
| 1,2       | 0,0821    | 0,0955 | 0,1066 | 0,1161 | 0,1241 | 0,1311 | 0,1370 | 0,1418 | 0,1457 | 0,1484 | 0,1497 |
|           | 1,4430    | 1,3701 | 1,3059 | 1,2476 | 1,1937 | 1,1430 | 1,0947 | 1,0482 | 1,0027 | 0,9576 | 0,9120 |
| 1,4       | 0,0968    | 0,1142 | 0,1288 | 0,1416 | 0,1529 | 0,1630 | 0,1723 | 0,1807 | 0,1884 | 0,1955 | 0,2020 |
|           | 1,5139    | 1,4659 | 1,4231 | 1,3838 | 1,3473 | 1,3129 | 1,2804 | 1,2493 | 1,2194 | 1,1907 | 1,1628 |
| 1,6       | 0,1070    | 0,1268 | 0,1437 | 0,1585 | 0,1717 | 0,1837 | 0,1947 | 0,2048 | 0,2141 | 0,2229 | 0,2311 |
|           | 1,5452    | 1,5086 | 1,4756 | 1,4452 | 1,4167 | 1,3898 | 1,3643 | 1,3398 | 1,3163 | 1,2936 | 1,2716 |
| 2,0       | 0,1224    | 0,1460 | 0,1663 | 0,1841 | 0,2001 | 0,2147 | 0,2282 | 0,2407 | 0,2523 | 0,2633 | 0,2736 |
|           | 1,5748    | 1,5494 | 1,5262 | 1,5047 | 1,4844 | 1,4652 | 1,4468 | 1,4291 | 1,4121 | 1,3956 | 1,3796 |

Примечание. Здесь и далее, в табл. 2, 3, в числителе  $\bar{\delta}$ , в знаменателе  $\bar{v}_s$ .

Таблица 2

Значения  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_s$  при различных  $Re_s$  и  $\bar{x}$  ( $\bar{R} = 1,6$ ,  $m_0 = 1,1$ )

| $Re_s \times 10^3$ | $\bar{x}$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 6         | 8      | 10     | 12     | 14     | 16     | 18     | 20     | 22     | 24     | 26     |
| 5                  | 0,0987    | 0,1180 | 0,1341 | 0,1479 | 0,1600 | 0,1707 | 0,1804 | 0,1892 | 0,1971 | 0,2044 | 0,2111 |
|                    | 1,0772    | 1,0604 | 1,0441 | 1,0282 | 1,0128 | 0,9976 | 0,9827 | 0,9680 | 0,9535 | 0,9392 | 0,9249 |
| 15                 | 0,0916    | 0,1098 | 0,1250 | 0,1381 | 0,1497 | 0,1600 | 0,1694 | 0,1779 | 0,1857 | 0,1929 | 0,1995 |
|                    | 1,0793    | 1,0646 | 1,0504 | 1,0365 | 1,0230 | 1,0097 | 0,9966 | 0,9838 | 0,9711 | 0,9585 | 0,9461 |
| 25                 | 0,0884    | 0,1061 | 0,1209 | 0,1337 | 0,1450 | 0,1552 | 0,1644 | 0,1728 | 0,1805 | 0,1876 | 0,1942 |
|                    | 1,0801    | 1,0664 | 1,0530 | 1,0400 | 1,0273 | 1,0148 | 1,0025 | 0,9904 | 0,9785 | 0,9667 | 0,9550 |
| 35                 | 0,0864    | 0,1037 | 0,1183 | 0,1309 | 0,1420 | 0,1520 | 0,1611 | 0,1694 | 0,1771 | 0,1841 | 0,1907 |
|                    | 1,0807    | 1,0675 | 1,0547 | 1,0422 | 1,0300 | 1,0180 | 1,0062 | 0,9946 | 0,9831 | 0,9718 | 0,9605 |

при  $m_0 < 1$   
при  $m_0 > 1$

$$\bar{\delta} = 0,0483 m_0^{-0,142} \bar{R}^{0,185} \bar{x}^{k_1} Re_s^{-0,053}, \quad (15)$$

$$\bar{v}_s = 1,3921 \bar{v} m_0^{-0,306} \bar{R}^{-0,327} \bar{x}^{k_2} Re_s^{0,0164}, \quad (16)$$

$$\bar{\delta} = 0,0611 m_0^{-0,731} \bar{R}^{0,17} \bar{x}^{k_1} Re_s^{-6,0565}, \quad (17)$$

$$\bar{v}_s = 1,4432 \bar{v} m_0^{-0,172} \bar{R}^{-0,424} \bar{x}^{k_2} Re_s^{0,0107}, \quad (18)$$

где  $k_1 = 0,845 - 0,432/\bar{R}$   
 $k_2 = 0,155 - 0,428/\bar{R}$ .

Таблица 3

Значения  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_0$  при различных  $m_0$  и  $x$  ( $Re_0 = 15 \cdot 10^3$ ,  $R = 1,4$ )

| $m_0$ | $x$    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 6      | 8      | 10     | 12     | 14     | 16     | 18     | 20     | 22     | 24     | 26     |
| 0,2   | 0,1080 | 0,1266 | 0,1425 | 0,1564 | 0,1689 | 0,1802 | 0,1906 | 0,2001 | 0,2089 | 0,2171 | 0,2247 |
|       | 1,9003 | 1,8262 | 1,7611 | 1,7025 | 1,6488 | 1,5990 | 1,5523 | 1,5083 | 1,4666 | 1,4268 | 1,3887 |
| 0,4   | 0,0968 | 0,1142 | 0,1288 | 0,1416 | 0,1529 | 0,1630 | 0,1723 | 0,1807 | 0,1884 | 0,1955 | 0,2020 |
|       | 1,5139 | 1,4659 | 1,4231 | 1,3838 | 1,3473 | 1,3129 | 1,2804 | 1,2493 | 1,2194 | 1,1907 | 1,1628 |
| 0,8   | 0,0860 | 0,1027 | 0,1166 | 0,1284 | 0,1388 | 0,1479 | 0,1561 | 0,1635 | 0,1702 | 0,1762 | 0,1816 |
|       | 1,1991 | 1,1704 | 1,1439 | 1,1189 | 1,0950 | 1,0722 | 1,0500 | 1,0284 | 1,0074 | 0,9868 | 0,9664 |
| 1,0   | 0,0910 | 0,1082 | 0,1222 | 0,1340 | 0,1443 | 0,1532 | 0,1611 | 0,1680 | 0,1742 | 0,1795 | 0,1841 |
|       | 1,1064 | 1,0800 | 1,0550 | 1,0312 | 1,0080 | 0,9855 | 0,9635 | 0,9418 | 0,9204 | 0,8990 | 0,8778 |
| 1,1   | 0,0850 | 0,1007 | 0,1137 | 0,1248 | 0,1344 | 0,1429 | 0,1505 | 0,1572 | 0,1632 | 0,1686 | 0,1733 |
|       | 1,0734 | 1,0525 | 1,0324 | 1,0130 | 0,9941 | 0,9756 | 0,9574 | 0,9395 | 0,9217 | 0,9041 | 0,8864 |
| 1,3   | 0,0751 | 0,0887 | 0,1001 | 0,1100 | 0,1186 | 0,1263 | 0,1333 | 0,1395 | 0,1452 | 0,1504 | 0,1551 |
|       | 1,0139 | 1,0007 | 0,9876 | 0,9746 | 0,9618 | 0,9490 | 0,9364 | 0,9238 | 0,9113 | 0,8988 | 0,8863 |

$$k_3 = 0,774 - 0,396/R;$$

$$k_4 = 0,155 - 0,402/R;$$

$\beta$  — коэффициент, учитывающий конечные размеры источника струйного потока.

Значение коэффициента  $\beta$  в формулах (16), (18) определяется по экспериментальным данным при условии  $x = x_{вх}$  и  $v_0 = v_{0вх}$ . В общем случае он зависит от особенностей истечения газа из шлица, которые, как отмечалось выше, определяются геометрическими характеристиками камеры. Главной из них является относительная площадь входа потока. Наилучшее совпадение опытных и расчетных данных по форму-

лам (16), (18) наблюдается, если  $\beta$  определять по полученным нами эмпирическим уравнениям:

при  $m_0 < 1$

$$\beta = 1,285 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,105}; \quad (19)$$

при  $m_0 > 1$

$$\beta = 1,668 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,188}. \quad (20)$$

Формулам (15) — (18) можно придать вид обобщенных уравнений, если в качестве масштабных величин использовать значения  $\delta$  и  $v_\delta$  на

границе входного участка и ввести координату  $\bar{x}_1 = x/x_{\text{вх}}$ . В этом случае имеем:

при  $m_0 < 1$

$$\tilde{\delta} = \delta/\delta_{\text{вх}} = \bar{x}_1^{k_1}; \quad (21)$$

$$\tilde{v}_\delta = v_\delta/v_{\delta_{\text{вх}}} = B \bar{x}_1^{k_2}, \quad (22)$$

где  $B = 1,286 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,092}$ ;

при  $m_0 > 1$

$$\tilde{\delta} = \bar{x}_1^{k_3}; \quad (23)$$

$$\tilde{v}_\delta = B \bar{x}_1^{k_4}, \quad (24)$$

где  $B = 1,743 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,193}$ .

На рис. 4 приведено сопоставление опытных и расчетных данных по формулам (21) — (24). Совпадение следует признать вполне удовлетворительным.

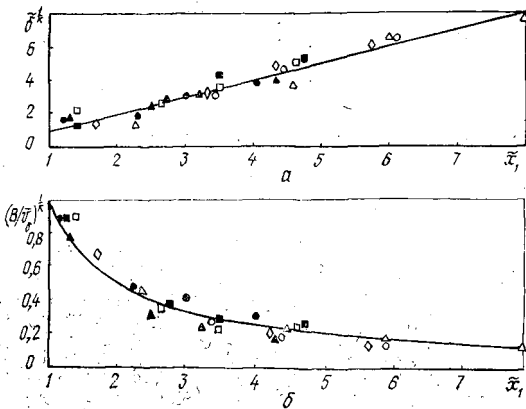


Рис. 4. Сопоставление опытных и расчетных данных для толщины пограничного слоя (а) и скорости на его границе (б) (Обозначения опытных точек приведены на рис. 3)

Подставив значение  $\tilde{v}_\delta$  из формул (22), (24) в уравнения (15), (17), найдем изменение  $\bar{\delta}$  в явном виде:

при  $m_0 < 1$

$$\bar{\delta} = 0,0563 B^{-0,0503} m_0^{-0,135} \bar{R}^{0,174} \bar{x}^{-k_5} \bar{x}_{\text{вх}}^{-k_6} \text{Re}_0^{-0,0503}; \quad (25)$$

при  $m_0 > 1$

$$\bar{\delta} = 0,071 B^{-0,0535} m_0^{-0,692} \bar{R}^{0,161} \bar{x}^{-k_7} \bar{x}_{\text{вх}}^{-k_8} \text{Re}_0^{-0,0535}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{где } k_5 &= 0,795 - 0,389/\bar{R}; \\ k_6 &= 0,0078 - 0,022/\bar{R}; \\ k_7 &= 0,724 - 0,353/\bar{R}; \\ k_8 &= 0,0082 - 0,0215/\bar{R}; \\ \text{Re}_0 &= v_{\delta \text{ вх}} r_0 / \nu. \end{aligned}$$

Необходимые для расчета характеристик потока на основном участке значения  $\delta$  и  $v_{\delta}$  в его начальном сечении, т. е. при  $x = x_{\text{вх}}$ , могут быть определены по следующим формулам:

$$\bar{v}_{\delta \text{ вх}} = v_{\delta \text{ вх}} / v_0 = 1,135 m_0^{-0,4}; \quad (27)$$

при  $m_0 < 1$

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_{\text{вх}} = \delta_{\text{вх}} / r_0 &= 0,0563 B^{-0,0503} m_0^{-0,135} \bar{R}^{0,174} \times \\ &\times \bar{x}_{\text{вх}}^{k_9} \text{Re}_0^{-0,0503}; \end{aligned} \quad (28)$$

при  $m_0 > 1$

$$\bar{\delta}_{\text{вх}} = 0,071 B^{-0,0535} m_0^{-0,692} \bar{R}^{0,161} \bar{x}_{\text{вх}}^{k_{10}} \text{Re}_0^{-0,0535}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{где } k_9 &= 0,8028 - 0,411/\bar{R}; \\ k_{10} &= 0,7322 - 0,3745/\bar{R}. \end{aligned}$$

В общем случае  $\bar{x}_{\text{вх}}$  является функцией  $\bar{f}_{\text{вх}}$  или  $m_0$  и определяется по формуле

$$\bar{x}_{\text{вх}} = x_{\text{вх}} / r_0 = 3,98 m_0^{0,706}. \quad (30)$$

Эти соотношения позволяют не только рассчитать основные параметры потока в периферийной зоне циклонных камер, но и перейти к решению соответствующей тепловой задачи. С этой точки зрения несомненный интерес имеет представление полученных в работе данных о распределении скорости в пристенном пограничном слое на боковой поверхности рабочего объема циклонных камер не только в виде рассмотренной степенной зависимости, но и в универсальных координатах.

На рис. 5 полученные нами данные представлены в координатах  $v^+ = v / (\tau_w / \rho)^{0,5}$ ;  $y^+ = (y / \nu) (\tau_w / \rho)^{0,5}$ . Для анализа принята трехслойная схема деления пристенного турбулентного пограничного слоя [3—5, 9]. В области вязкого подслоя ( $0 \leq y^+ \leq 5$ ) и промежуточного слоя ( $5 \leq y^+ \leq 40$ ) представленные распределения соответствуют зависимостям, обычно наблюдаемым в этих областях на поверхности пластины и в трубах [2]:

при  $0 \leq y^+ \leq 5$

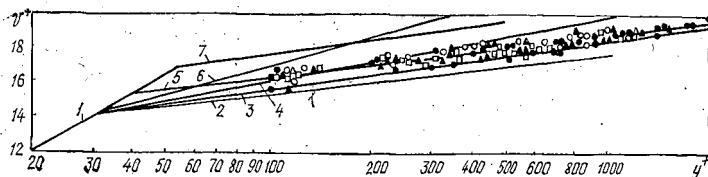


Рис. 5. Сопоставление распределения скорости в пристенном пограничном слое на боковой поверхности циклонной камеры в универсальных координатах с опытными данными и рекомендациями других авторов: 1 — [2]; 2 — [11]; 3 — [9]; 4 — [8]; 5 — (33); 6 — [2]; 7 — [7] (Обозначения опытных точек приведены на рис. 3).