

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТОПЛЕННОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ ПРИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАКРУТКИ

С. Ю. КРАШЕНИННИКОВ

(Москва)

Экспериментально определены характеристики струйного течения, возникающего вблизи среза центробежной форсунки (до сечений, соответствующих окончанию зоны обратного тока). Получено распределение средней скорости, концентрации примеси и интенсивности турбулентных пульсаций скорости при различной начальной закрутке.

1. Известный экспериментальный материал подобных исследований, например [1-5], не позволяет описать зависимости осредненных характеристик течения от интенсивности закрутки при больших значениях последней, когда струя имеет вблизи среза форсунки возвратное течение. Известные опытные данные либо ограничиваются минимальным значением закрутки, при которой наблюдается обратный ток [1, 3], либо получены по результатам исследования струйного течения за закручивателями специальной конструкции [4, 5], которые оказывают определяющее влияние на формирование течения вблизи среза форсуночного устройства.

В опытах исследовалось струйное течение за четырьмя центробежными форсунками с цилиндрической камерой завихрения длиной 30 мм и диаметром 18 мм при значении геометрической характеристики $A = 0,75, 2,5, 4,5, 6$ [6]. Форсунки имели по двенадцать отверстий для подачи воздуха по хордам внутреннего сечения с плечом подачи соответственно 1, 3, 6 и 8 мм.

Несколько опытов были посвящены исследованию влияния на течение геометрии форсунки. Для этого были использованы форсунки с другими относительными размерами камеры завихрения и плеча подачи газа: длина камеры варьировалась в пределах 20 ÷ 40 мм, диаметр в пределах 8—18 мм.

Средняя по расходу скорость истечения определялась по перепаду давления на специально протарированной мерной диафрагме с точностью $\pm 3\%$. В большинстве опытов значение u_0 составляло 10 м/сек. В некоторых опытах скорость истечения изменялась в 3—4 раза с целью определения влияния числа Рейнольдса на характеристики течения, которое оказалось незначительным и находилось в пределах точности измерений.

Измерения компонент вектора скорости осуществлялись при помощи двух термоанемометров с постоянной температурой нити типа УТА-5 X-образным датчиком с двумя нитями из вольфрамовой проволоки диаметром 20 мк, длиной 4 мм. Подробно характеристики использованной аппаратуры описаны в работе [7]. Измерение спектров пульсаций скорости показало, что ее частотный диапазон был достаточен для определения интенсивности пульсаций вектора скорости e .

В опытах определялось распределение концентрации примеси в струе, для чего в воздух, вытекающий из форсунки, добавлялось до 15—20% (по массе) фреона — 12. Смесь, отбравшаяся в потоке при помощи насадка типа трубки полного напора 2×1 мм², поступала в малоинерционный датчик концентрации типа теплового детектора. Отбор смеси обеспечивался вакуумным насосом, а постоянно скорости ее прохождения через систему при фиксированном значении концентрации обеспечивалось капилляром, установленным сразу за датчиком. Скорость движения смеси в канале трубки отборника была порядка 5—10 м/сек.

Пневмометрические измерения проводились только на оси струи при помощи T-образного насадка с плечами по 2,5 мм каждое и датчиком статического давления, выполненным в виде трубки диаметром 1,5 мм, длиной 150 мм, что позволило при введении его в поток, располагать державку насадка вне зоны возвратного течения. При измерениях использовался наклонный микроанометр, и точность перепадов давления при необходимости составляла $\mp 0,1$ мм вод. ст.

2. Исследования распыливания жидкости с помощью центробежных форсунок показывают, что при анализе течения необходимо наряду со значением параметра A учитывать расходную характеристику форсунки, которая может быть определена с помощью эмпирических закономерностей [6]. Оказалось, что при организации с помощью центробежной форсунки закрученной воздушной струи, геометрическая характеристика форсунки A также не определяет в полной мере возникающего течения. Например, измерения длины зоны обратных токов (с помощью T-образного насадка) показали, что при одних и тех же значениях геометрической характеристики A длина зоны обратного течения у форсунок с разными относительными размерами может различаться в полтора-два раза.

Значительно лучшее согласование результатов измерения длины зоны обратного течения для разных форсунок имеет место при построении зависимости длины зоны

обратного тока от разрежения (по сравнению с атмосферой), измеряемого на оси струи в плоскости среза форсунки Δp_0 . На фиг. 1 изображена зависимость длины зоны обратного тока l от параметра $(\Delta p_0)^{1/2}$. Здесь и в дальнейшем все линейные размеры отнесены к радиусу сечения среза форсунки, перепады давления — к скоростному напору, вычисленному по среднерасходной скорости истечения u_0 .

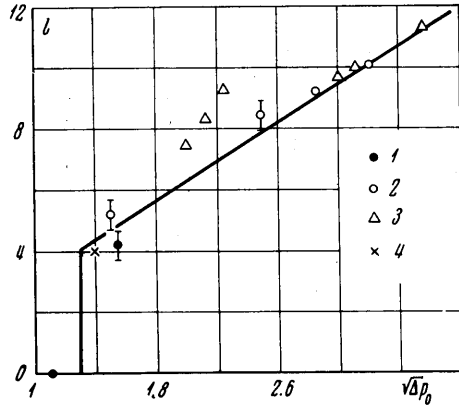
Различные обозначения на фиг. 1 соответствуют изменению относительной величины плеча при закручивании h ; точки 1, 2, 3 соответствуют значениям: $h < 0.3$, $h < 0.7$, $h > 0.7$, точки 4 — данные работы [2]. Отклонение от общей зависимости нескольких точек при $(\Delta p_0)^{1/2} = 2.0-2.3$ объясняется ошибкой измерения перепада статического давления из-за введения насадка в форсунку, в этом случае его относительный размер не был достаточно малым, что приводило к уменьшению измеряемого перепада давления.

Сопоставление результатов измерения вращательной компоненты скорости w на срезе форсунки с данными измерений статического давления показало, что имеет место связь максимального значения компоненты скорости w_0 с разрежением Δp_0

$$\sqrt{\Delta p_0} = 1.38 w_0$$

Здесь и в дальнейшем все значения скорости отнесены к средней по расходу скорости истечения u_0 .

Анализ данных фиг. 1 показывает, что возвратное течение в струе возникает при интенсификации закрутки, когда максимальное значение вращательной компоненты скорости на выходе из форсунки начинает превышать значение среднерасходной скорости истечения ($w_0 > 1$). При этом протяженность зоны обратного

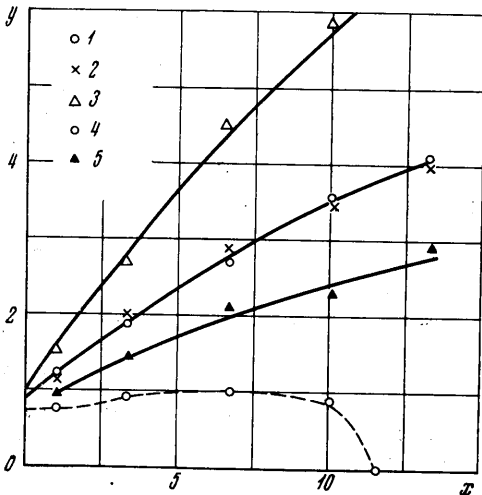


Фиг. 1

тока сразу имеет конечное значение ($l \approx 4$) и нарастает пропорционально увеличению интенсивности начальной закрутки w_0 .

Подробное исследование течения проводилось при значениях $w_0 = 1.1, 1.8, 2.15, 2.5$. При этом длина зоны обратного тока изменялась от своего практически минимального значения $l \approx 4.5$ до $l \approx 12$. Увеличение начальной закрутки вызывает и более интенсивное расширение струи; это затрудняет исследование течения при $w_0 > 2.5$, так как струя начинает прилипать к элементам конструкции установки, на которой производятся измерения. Если в плоскости среза форсунки имеется экран (истечение из стенки) при $w_0 > 2.0 \div 2.3$, струя может прилипнуть к нему, вследствие чего организуется пристеночное течение. Этот эффект упоминается в работе [1].

3. Общее представление о геометрии течения дают результаты определения координат точек, где гидродинамические параметры имеют



Фиг. 2

некоторые характерные значения. Сюда относятся координаты границы зоны обратного тока y_0 , определявшиеся из условия равенства нулю продольной компоненты скорости u , координаты y_{um} , где она имеет максимальное значение u_m , координаты «полуширины» по скорости y_u , где $u = 0.5u_m$, координаты y_w , где имеется максимум модуля вектора скорости, и координаты y_{wm} , где вращательная компонента скорости имеет максимальное значение w_m . Для иллюстрации на фиг. 2 приведены результаты определения этих параметров в струе при $w_0 = 2.5$, нумерация обозначений соответ-

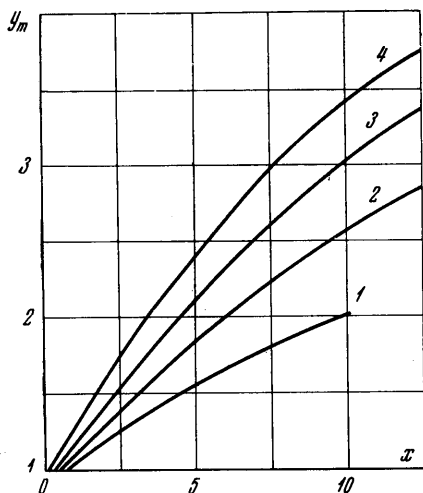
ствует тому порядку геометрических характеристик течения, в котором они были введены.

Аналогичные данные были получены и при других значениях закрутки. Их анализ показывает, что в той части струи, где вдоль ее оси имеется возвратное течение, максимум вращательной компоненты располагается вне его, но ближе к оси, чем максимум продольной компоненты скорости, причем с достаточной точностью выполняется соотношение

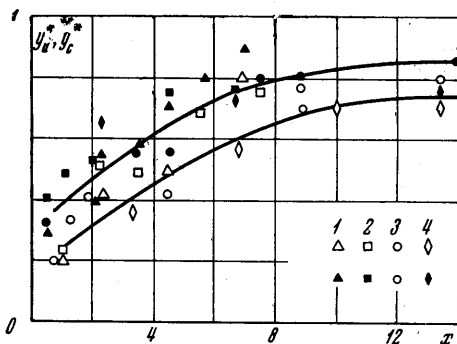
$$y_{wm} = 0.77y_{um}$$

Положение же максимума продольной компоненты скорости y_{um} зависит от начальной интенсивности закрутки w_0 ; кривые 1, 2, 3, 4 на фиг. 3 соответствуют значениям закрутки $w_0 = 1.1$, $w_0 = 1.8$, $w_0 = 2.15$, $w_0 = 2.5$. Опыты показали, что с координатой y_{wm} можно связать другие геометрические характеристики течения зависимостями, справедливыми при разных значениях закрутки.

Сюда относятся результаты измерения распределения концентраций примеси. Это



Фиг. 3



Фиг. 4

распределение в той части струи, где имеется обратный ток, немонотонно из-за переноса возвратным течением по оси струи перемешивающейся жидкости. Значение координаты y_{cm} , где концентрация примеси имеет максимальное значение c_m , связано с характерными координатами распределения скорости простой зависимостью

$$y_{cm} = y_m = y_{um}$$

Там же, где имеется максимальное значение продольной компоненты скорости, наблюдается экстремальное значение ее радиальной компоненты v .

Результаты измерений показывают, что при $y = y_m$, $v/u \approx dy_m/dx$. Совокупность этих данных говорит о том, что основное поступательное движение в струе происходит вдоль линии $y = y_m$. Данные фиг. 3 являются опорными для описания геометрии течения, потому что практически все геометрические характеристики течения удается связать с координатой y_m .

На фиг. 4 представлены результаты определения по данным измерений значений y_i^* (светлые значки) и y_c^* (темные значки), связанных с полушириной профилей скорости и концентрации соотношениями

$$y_i^* = \frac{y_i - y_m}{y_m}, \quad y_c^* = \frac{y_c - y_m}{y_m}$$

Здесь y_c — координата точки, $c = 0.5 c_m$.

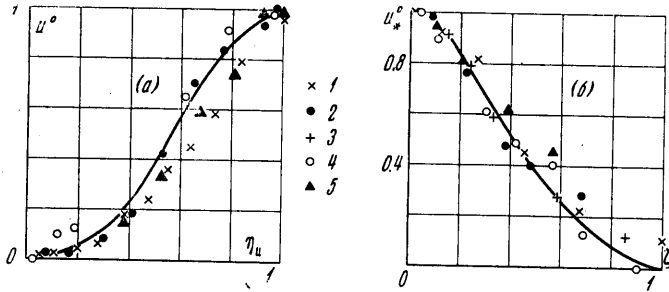
К концу зоны обратного течения при всех исследованных закрутках (нумерация на фиг. 4, как на фиг. 3) относительная полуширина профилей скорости и концентрации приобретает значения

$$y_i^* = 0.75, \quad y_c^* = 0.85$$

4. Определение геометрических характеристик течения позволяет найти координаты подобия для распределений концентрации и компонент скорости [8]. На фиг. 5 представлены результаты построения профилей продольной компоненты скорости при $w_0 = 2.5$ в координатах подобия для «внутренней» (фиг. 5, а) и «внешней» (фиг. 5, б) частей струи

$$\eta_u = \frac{y}{y_m}, \quad u^\circ = \frac{u - u_a}{u_m - u_a}, \quad \zeta = 0.43 \frac{y - y_m}{y_u - y_m}, \quad u_{*}^\circ = \frac{u}{u_m}$$

Здесь u_a — значение скорости на оси струи, отрицательное в зоне обратного тока. Точки 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют поперечным сечениям струи: $x = 0.9, 3.3, 6.7, 10.0, 13.3$.



Фиг. 5

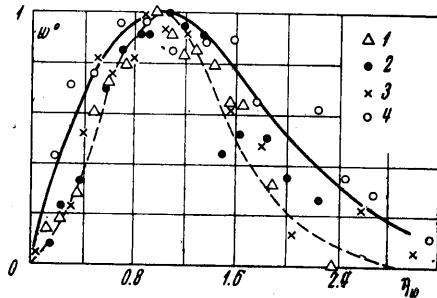
Видно, что в координатах подобия профили продольной скорости хорошо аппроксимируются кривыми Шлихтинга [8], которые нанесены на фиг. 5 сплошными линиями. Аналогичные результаты были получены и при других значениях начальной закрутки, а также и при измерениях распределения концентрации, для которого координатами подобия будут

$$\eta_c = \frac{y}{y_m} = \eta_u, \quad c^\circ = \frac{c - c_a}{c_m - c_a},$$

$$\zeta = 0.43 \frac{y - y_m}{y_c - y_m}, \quad c_{*}^\circ = \frac{c}{c_m}$$

Для профиля вращательной компоненты скорости найти такие координаты подобия, в которых профиль не трансформировался бы от сечения к сечению, не удалось. На фиг. 6 изображены результаты соответствующих измерений в различных поперечных сечениях струи (нумерация та же, что и на фиг. 5) при $w_0 = 2.5$ в виде зависимости величины $w^\circ = w / w_m$ от относительной поперечной координаты $\eta_w = y / y_{w_m}$.

Профиль вращательной компоненты скорости трансформируется от менее наполненного в исходном сечении (штриховая линия) к более наполненному в конце зоны возвратного течения (сплошная линия). Первая линия получена осреднением результатов измерений при различных закрутках в сечении $x = 0.9$, вторая является теоретической кривой для слабых закруток [9], которая хорошо описывает профиль вращательной компоненты скорости вблизи конца зоны обратных токов и согласуется с известными результатами измерений [1-3].



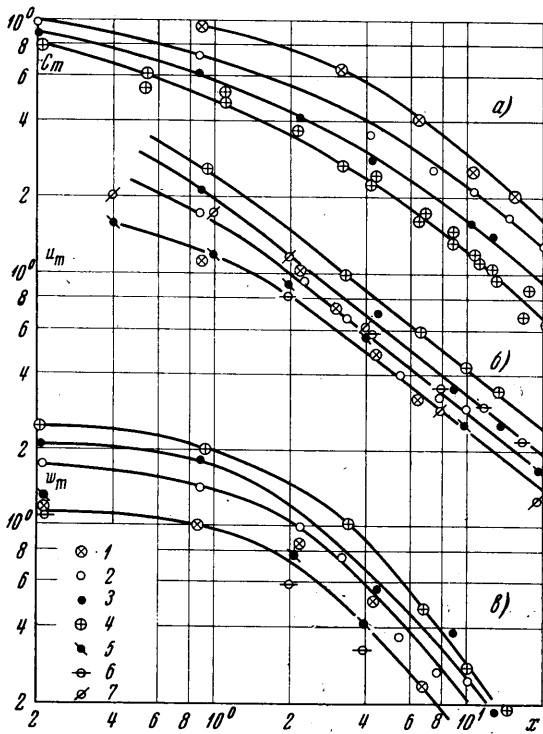
Фиг. 6

5. Для полного описания осредненных характеристик исследованного течения остается привести результаты определения характерных значений газодинамических параметров в различных сечениях струи.

Эти данные представлены в логарифмических координатах на фиг. 7 в виде зависимостей величин c_m , u_m , w_m от продольной координаты x для различных значений закрутки

Точки	1	2	3	4	5	6	7
$w_0 =$	1.1	1.8	2.15	2.5	1.3	1.08	—

Точки 5 и 6 заимствованы из работ [2] и [1], точки 7 — из работы [3], при этом значение w_0 не известно. Легко заметить, что все зависимости характерных параметров течения являются практически универсальными для разных закруток, начиная с некоторого сечения, и могут быть сведены к единой зависимости отнесением к соответствующему значению параметра в этом сечении. Более того, для вращательной компоненты скорости w_m все полученные зависимости могут быть сведены к одной отнесением к начальной закрутке w_0 (это отмечено также в работах [1, 3]).



Фиг. 7

универсальный параметр закрутки φ , характеризующий отношение максимального значения вращательной компоненты скорости к максимальной разнице значений продольной компоненты скорости в данном сечении. При этом с достаточной точностью выполняется соотношение $\varphi = w_m / (u_m - u_a) = 0.6$.

Универсальность параметра φ не только позволяет определять по уже представленным данным скорость на оси струи u_a , но и свидетельствует о единообразии механизма равновесия закрученной струи с обратным током на оси.

На отрезке длиной $\sim 2-3$ радиусов форсунки, где возвратное течение кончается, значение скорости на оси становится положительным и достигает величины $u_a = 0.3u_m$, выполняется соотношение

$$\varphi = w_m / u_m \approx 0.6$$

В сечениях, расположенных еще ниже по потоку, происходит монотонное уменьшение параметра φ .

Результаты определения концентрации на оси струи в исследованном течении для разных значений закрутки удовлетворительно описываются простой зависимостью

$$c_m - c_a = 0.22u_a c_m$$

6. В опытах измерялась интенсивность пульсаций вектора скорости ϵ с помощью термоанемометра, нить датчика которого ориентировалась по нормали к направлению скорости в каждой точке потока. Эти измерения показали, что поперечное распределение интенсивности пульсаций соответствует имеющимся данным для обыч-

ного течения, и могут быть сведены к единой зависимости отнесением к соответствующему значению параметра в этом сечении. Более того, для вращательной компоненты скорости w_m все полученные зависимости могут быть сведены к одной отнесением к начальной закрутке w_0 (это отмечено также в работах [1, 3]).

Интересно отметить, что с ростом интенсивности закрутки для $w_0 > 1$ при сохранении расхода через форсунку максимальные значения продольной компоненты скорости в поперечных сечениях струи возрастают. Это связано с увеличением площади, занимаемой на срезе форсунки обратным током, и соответствующим уменьшением площади, через которую воздух вытекает из форсунки. Фиг. 7 показывает, что результаты измерений также удовлетворительно согласуются с данными работ [1-3], полученными при $w_0 \approx 1$.

Для того чтобы закончить описание течения, необходимо привести результаты измерения скорости и концентрации на оси струи. Опыты показали, что в той части струи, где имеется возвратное течение, при всех значениях начальной закрутки существует

ных, не закрученных струй [10]. На линии, соответствующей основному поступательному движению в струе $y = y_m$ (в обычных струях $y_m = 0$), величина интенсивности пульсаций такая же, как и в обычных струях

$$\varepsilon \approx 0.25$$

Величина ε достигает максимума в местах максимальных градиентов скорости, в конце зоны обратного тока и на периферии ($\varepsilon \approx 0.5$). Приведенное максимальное значение интенсивности не является точным из-за отсутствия линеаризатора выходной характеристики термоанемометра, но согласуется с результатами определения максимальной интенсивности пульсаций скорости в обычной струе с помощью аналогичной аппаратуры.

Измерения интенсивности пульсаций скорости на оси струи согласуются с данными работы [11], где приведены результаты соответствующих измерений в струе, исследованной в работе [3]. В опытах наблюдалось различие в значениях величин ε_0 , измерившихся на оси вблизи среза форсунки при различных закрутках: так, $\varepsilon_0 = 0.25$ при $w_0 = 1.1$ и $\varepsilon_0 = 0.1$ при $w_0 = 2.5$, т. е. с увеличением интенсивности закрутки происходит уменьшение относительной интенсивности пульсаций на оси струи. Это связано с тем, что с ростом закрутки возрастает продольный градиент давления (фиг. 1), ускоряющий движение в обратном токе, и относительная интенсивность возмущений падает из-за роста абсолютного значения скорости.

Как уже указывалось, в опытах измерялась не только интенсивность пульсаций, но и их энергетический спектр. Это позволяло фиксировать характерные частоты пульсаций. При подаче воздуха через форсунку слышен однотонный свист. Регистрация спектра пульсаций давления с помощью микрофона, установленного вне струи на некотором удалении от форсунки, показала, что в этом спектре имеются всплески на двух характерных частотах f_1 и f_2 — основной тон и обертоном ($f_2 = 2f_1$). Интегрирование спектра показало, что вклад в энергию пульсаций давления на этих частотах составляет 70—80%. В спектрах скоростных пульсаций всплески наблюдаются на тех же частотах, хотя их вклад в общую энергию турбулентных пульсаций незначителен и зависит от положения датчика в потоке. Легко различимые всплески на характерных частотах наблюдались при установлении датчика термоанемометра вблизи среза форсунки ($x < 2$). Наличие характерных частот пульсаций связано с возвратным течением, которое, по-видимому, является необходимым звеном в механизме обратной связи.

При использовании форсунок, на срезах которых $w_0 < 1$, т. е. в случае отсутствия возвратного течения, характерные частоты не наблюдались. Для значений же $w_0 > 1$ зависимость числа Струхалия, вычисленного по первой характерной частоте, диаметру форсунки и среднерасходной скорости, от закрутки хорошо аппроксимируется следующей зависимостью:

$$S = 0.7w_0$$

Рост числа Струхалия при интенсификации закрутки связан с увеличением характерной продольной скорости (фиг. 7).

7. Результаты измерения профилей средней скорости и концентрации, а также характерных значений интенсивности скоростных пульсаций, показывают, что закрученная струя, имеющая на своей оси возвратное течение, близка по своим свойствам к обычным струйным потокам [3]. Анализ подобных течений принято проводить в рамках уравнений пограничного слоя [8, 9].

В связи с этим значительный интерес представляет установление возможности их применения для анализа подобного течения, по крайней мере начиная с той части струи, где уже отсутствует обратный ток. Основным допущением приближения пограничного слоя при анализе течения в свободной закрученной струе, является предположение о том, что отклонение значений давления от атмосферного связано лишь с наличием закрутки и турбулентных пульсаций. В этом случае соответствующее уравнение движения запишется в таком виде:

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \langle v'^2 \rangle = \int_{\infty}^y \frac{w^2}{y} dy$$

Здесь v' — радиальные пульсации скорости, скобки $\langle \rangle$ обозначают осреднение по времени, $\Delta p = p - p_{\infty}$ — разница между давлением в струе и окружающей среде.

В опытах измерялось статическое давление на оси струи и все члены уравнения могли быть вычислены по результатам измерений (предполагалось, что на оси струи $\langle v'^2 \rangle = \langle u'^2 \rangle$).

Величина относительного разрежения на оси $(\Delta p)^{1/2} / w_m$, измеренная в опытах, изменялась от 1.38 в начальном сечении до 1.2 вне зоны обратного тока. Та же величина, вычисленная по профилю вращательной скорости, изменялась от 0.95 до 1.25.

в тех же сечениях. Хорошее соответствие ($\pm 10\%$) между измеренными и вычисленными величинами $(\Delta p_a)^{1/2}$ наблюдается с сечений $x = 4 \div 5$, учет пульсаций скорости слабо сказывается на этих результатах, добавляя не более 5% к вычислявшейся величине.

8. При исследовании свободных струйных течений контроль правильности измерений обычно осуществляется по условиям сохранения некоторых интегральных параметров, например, потока импульса и потока момента количества движения. Наличие возвратного течения затрудняло проведение такого контроля, так как при этом необходимо было вводить в обработку разницы экспериментальных величин, а исходные значения соответствующих инвариантов не были известны. Поэтому контроль правильности измерений был проведен в одном сечении, расположенном вне зоны обратного тока по величине расхода примеси, значение которого в исходном сечении измерялось по показаниям мерной диафрагмы. Для этого использовалось справедливое в приближении пограничного слоя соотношение

$$\int_0^{\infty} \rho u v dy = Q = Q_0$$

Для всех значений закрутки это равенство выполнялось с точностью $\pm 7\%$.

Кроме того, можно отметить хорошее согласование результатов измерений с данными работ [1-3, 11] при значении закрутки $\omega_0 = 1.0 \div 1.5$.

Автор благодарит Г. Б. Краушкину, обрабатывавшую данные измерений, и Ю. В. Яковлевского, принимавшего участие в обсуждении результатов работы.

Поступило 28 X 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Chigier U. A., Chervinsky A. Experimental investigation of swirling vortex motion in jets. Trans ASME. Ser. E. J. Appl. Mech., 1967, vol. 34, No. 2.
2. Ляховский Д. Н. Аэродинамика закрученных струй и ее значение для факельного процесса сжигания. Сб. «Теория и практика сжигания газа», М., Гостехиздат, 1958, стр. 28-77.
3. Maier P. Untersuchung isothermer drallbehafteter Freistrahlen. Forsch. Ingenieurwesen, 1968, Bd. 34, Nr. 5.
4. Mathur M. L., MacCallum N. R., L. Swirling air jets issuing from vane swirlers, pt 1: free jets. J. Inst. Fuel., 1967, vol. 40, No. 316.
5. Коробко В. И., Адинсков Б. П., Шуркин Е. П. Особенности аэродинамики кольцевых закрученных струй, формируемых турбогорелками. Сб. Использование газа в народном хозяйстве. Тр. ин-та ГипроНИИгаз, 1968, вып. 284-302.
6. Бородин В. А., Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Ягодкин В. И. Распыливание жидкости. М., «Машиностроение», 1967.
7. Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н. Связь между коэффициентом диффузии и эйлеровыми характеристиками турбулентности в различных потоках. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 1.
8. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
9. Лойцянский Л. Г. Распространение закрученной струи в безграничном пространстве, затопленном той же жидкостью. ПММ, 1953, т. 17, вып. 1.
10. Хинце И. О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М., Физматгиз, 1963.
11. Maier P. Turbulenzmessungen an isothermen Drallfreistrahlen. Forsch. Ingenieurwesen, 1969, Bd 35, Nr 4.

УДК 536.24.532.52

ТЕПЛОБМЕН НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ТУРБУЛЕНТНЫМ СТРУЙНЫМ ПОТОКОМ

В. А. КАРПОВ

(Москва)

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований теплообмена на поверхности, обтекаемой турбулентным струйным потоком с сильной поперечной неоднородностью, а также данные исследований распределения газодинамических параметров на начальном участке сверхзвуковой турбулентной затопленной струи.