

ПЛОСКАЯ СТРУЯ ВО ВНЕШНЕМ ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Ю. В. ИВАНОВ,

кандидат технических наук

Необходимость определения траекторий турбулентных плоских струй воздуха во внешнем поперечном потоке возникает в связи с расчетом острого дутья, воздушных завес, газовых горелок, опылителей, шахтных печей и в других специальных случаях.

Решение этой задачи в общем виде встречает большие математические трудности. Опубликованные аналитические исследования (1—4, 8—11) связаны с рядом допущений, ограничений и гипотез, не всегда отражающих физическую сущность явления. Все эти работы не дают согласующихся между собой решений. Более плодотворным путем исследования рассматриваемого случая является путь экспериментальный, с последующим сравнением накопленного опытного материала с существующими аналитическими решениями.

В данной статье излагается экспериментальное исследование траекторий изотермических и неизотермических плоских воздушных струй во внешнем поперечном однородном потоке.

При постановке опытов мы исходили из установленного различными исследователями факта независимости закономерностей свободных турбулентных струй от критерия Рейнольдса (Re).

Опыты Д. Н. Ляховского и С. Н. Сыркина (7) с неизотермическими струями показали, что при числе Архимеда (Ar) меньше 0,005 можно пренебречь искривлением струй, вытекающих в неподвижное пространство. Ограничив проведение опытов со струями при Ar меньше 0,005, мы тем самым можем исключить и это влияние.

При отсутствии влияния критериев Re и Ar траектории струй, построенные в относительных координатах, следует поставить в зависимость от следующих определяющих параметров:

- 1) угла атаки струи (α),
- 2) коэффициента структуры струи (a),
- 3) параметра $\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$.

Безразмерный параметр $\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$ является соотношением количеств движения секундного расхода потока и струи или соотношением их скоростных напоров. Индекс «1» относится к потоку, а индекс «2» к струе. Этот параметр был предложен нами (5,6) и оказался полезным при обработке траекторий изотермических и неизотермических круглых струй.

В этой работе * предполагалось также проверить обобщение траекторий плоских струй по данному параметру.

Коэффициент a структуры плоских струй, введенный проф. Г. Н. Абрамовичем, дал возможность обобщить струи с различной начальной турбулентностью. Поэтому при изучении струй разной турбулентности коэффициент a войдет в качестве параметра.

Также в качестве самостоятельного параметра должен войти угол атаки струй α , так как при переходе от одного угла атаки к другому мы, по существу, переходим к новым условиям перемешивания. Кроме того, траектория струи непосредственно зависит от первоначального направления струи в устье.

В качестве характерного линейного размера плоских струй во внешнем поперечном потоке принимаем полуширину сопла в устье b_0 . Уравнение траекторий плоской струи во внешнем поперечном потоке требуется найти в виде:

$$\frac{y}{b_0} = f\left(\frac{x}{b_0}; a; \frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}; \alpha\right), \quad (1)$$

где x и y — расстояния вдоль осей координат от полюса в центре устья сопла до оси струи в произвольном поперечном ее сечении;

α — угол атаки (между струей и потоком), принятый равным нулю, когда поток и струя движутся параллельно и в одном направлении, и равным 180° , когда поток и струя движутся навстречу один другому;

ρ_1, v_1 — плотность и скорость потока;

ρ_2, v_2 — плотность и скорость на оси струи в устье.

Описание экспериментальной установки и измерений

На фиг. 1 показана экспериментальная установка. Основная часть ее состоит из топки, газового воздухоподогревателя, электронагревателей, вентиляторов и набора сопел.

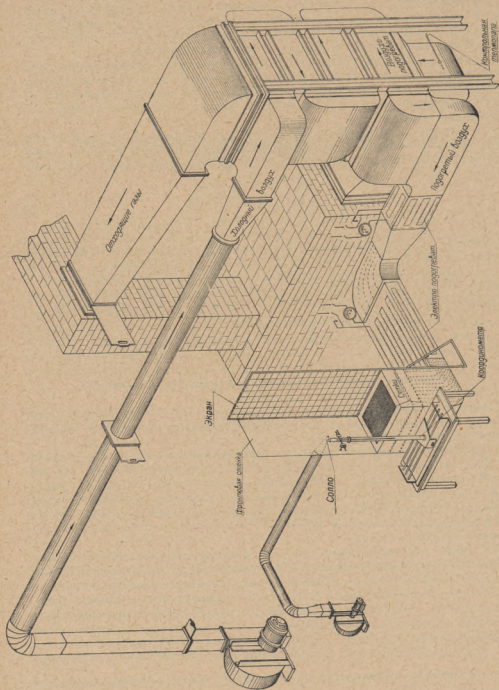
Внешний воздушный поток (с неравномерностью скоростей около $\pm 5\%$) выходил из вертикального канала сечением 480×600 мм. В этот свободный поток, двигающийся снизу вверх, вдувалась через сопло воздушная струя. По мере своего продвижения под воздействием внешнего потока струя изгибалась. Сопла имели прямоугольную форму и ориентировались большей стороной устья поперек потока. Такие сопла носят название плоских.

С одной стороны внешний поток ограничивался фронтальной стеной высотой 1250 мм, служившей местом установки сопел. Сопла были съемные и могли ставиться под различными углами атаки к внешнему потоку.

В опытах производились скоростные и температурные замеры вдоль оси струи и в поперечных ее сечениях. По скоростным и температурным замерам определялись дальнобойность струи, изменение скорости и температуры вдоль оси струи и траектория скоростной оси струи.

Под дальнобойностью струи D_1 понимается относительное расстояние $\frac{x}{b_0}$ по нормали от плоскости устья до места струи, в котором проекция осевой скорости на ось x составляет 5% устьевой скорости.

* При проведении работы в Центральном научно-исследовательском котло-турбинном институте (ЦКТИ) автором были получены ценные советы от проф. В. С. Жуковского и кандидата технических наук С. С. Кутателадзе.



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки

Траектории струй, найденные по замерам, могли сравниваться с траекториями, определенными по фотографиям окрашенных дымом струй.

Изменение плотности струи в устье производилось регулированием ее температуры при помощи электронагревателей.

Измерения температуры струи производились нихром-константовыми термомпарами из проволок диаметром 0,1 мм.

Скорость струи измерялась изогнутой трубкой с лимбом, имеющим деления для отсчета угла поворота *. Значения скоростей в опытах менялись от 3,5 до 80 м/сек.

Во время опыта осуществлялся периодический контроль температуры и скорости струи в устье.

Как указывалось выше, струя под влиянием скоростного напора потока изгибалась, поэтому измерения температуры и скорости вдоль ее оси представляли некоторые особенности. Сечения, в которых измерялись скорость и температура, выбирались по перпендикулярному направлению к вектору максимальной скорости струи. В каждой из исследуемых струй выбиралось от пяти до десяти сечений, ориентированных под различными углами φ к горизонту.

Изогнутая ось струи, проходящая через точки, где наблюдалось максимальное значение скорости в поперечных сечениях, названа траекторией струи.

Расстояние от устья до сечений выражалось отношением $\frac{L}{b_0}$ (длины траектории струи L к полуширине сопла в устье b_0).

Опыты проводились с соплами двух типов, ориентированными под углами к горизонту $\alpha = 90^\circ$ и 120° , с коэффициентами структуры a , равными 0,08 и 0,12.

Максимальная относительная ошибка в опытах при измерении температуры составляла 2%, а при измерении скорости 4%.

Результаты опытов

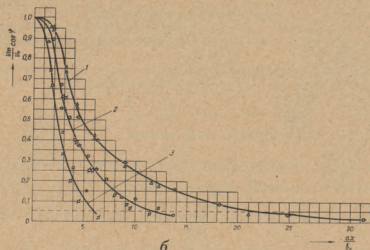
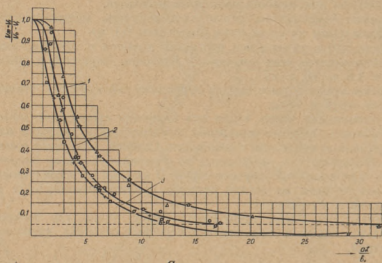
Со струями во внешнем поперечном потоке было проведено 25 опытов при четырех значениях отношения скоростей струи и потока $\frac{v_2}{v_1}$ (5, 7,1; 10; 20) и при двух значениях отношения температур $\frac{T_2}{T_1}$ (1 и 2). При этом параметр $\frac{v_1 v_1^2}{v_2 v_2^2}$ изменялся от 0,0025 до 0,08, т. е. более чем в 30 раз.

Опыты проводились с тремя соплами при $\frac{h_1}{b_0} = 10; 33$ и $44,5$, где h_1 — большая сторона сопла в устье. Абсолютные размеры исследуемых сопел b_0 составляли 0,9; 2,7 и 4 мм. Изменение ширины сопел более чем в четыре раза являлось достаточным для того, чтобы подтвердить или опровергнуть возможность обобщения плоских струй в потоке, при отнесении всех линейных размеров к полуширине сопла в устье.

В отличие от затопленных струй, за осевую скорость струи во внешнем однородном потоке принята не абсолютная скорость на оси струи

* Краткое описание измерительной трубки дано в работе автора (6).

v_m , а разность скоростей $v_m - v_1$, где v_1 — скорость потока. За осевую скорость струи в устье также принята разность скоростей $v_0 - v_1$, где v_0 — скорость на оси струи в устье.



Фиг. 2. Изменения разностей и проекций осевых скоростей плоских струй во внешнем потоке

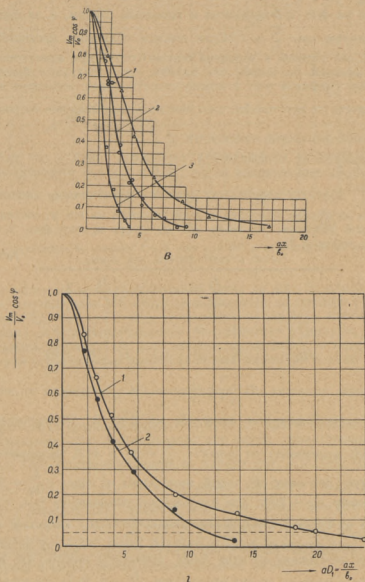
a — разности осевых скоростей при $\frac{T_2}{T_1} = 1$ и $\alpha = 90^\circ$;

$$1 - \frac{v_2}{v_1} = 20; \quad 2 - \frac{v_2}{v_1} = 10; \quad 3 - \frac{v_2}{v_1} = 5$$

b — проекции осевых скоростей при тех же условиях.

Изменение безразмерной осевой скорости $\frac{v_m - v_1}{v_0 - v_1}$ в зависимости от безразмерного расстояния $\frac{ax}{b_0}$ показано на фиг. 2, a . Сравнивая кривые при различных отношениях скоростей, можно видеть, что, чем меньше

отношение $\frac{v_2}{v_1}$, тем быстрее падает безразмерная осевая скорость струи. Из графика видно, что точки, полученные из опытов со струями, имеющими различные значения коэффициентов структуры a , обобщаются в единые кривые.



Фиг. 2. Изменения разностей и проекций осевых скоростей плоских струй во внешнем потоке

a — проекции осевых скоростей при $\frac{T_2}{T_1} = 2$ и $\alpha = 90^\circ$; 1 — $\frac{v_2}{v_1} = 20$;

$$2 - \frac{v_2}{v_1} = 10; \quad 3 - \frac{v_2}{v_1} = 5$$

z — проекции осевых скоростей при $\frac{T_2}{T_1} = 1$ и $\alpha = 120^\circ$; 1 — $\frac{v_2}{v_1} = 20$; 2 — $\frac{v_2}{v_1} = 10$

Для того чтобы найти количественные зависимости затухания плоских струй, развивающихся во внешнем однородном потоке, используем введенное выше понятие о дальнобойности струй D_1 . С этой целью на фиг. 2, б и 2, в построены проекции осевых скоростей на горизонтальную ось $\frac{v_m}{v_0} \cdot \cos \varphi$ в зависимости от безразмерной величины $\frac{ax}{b_0}$.

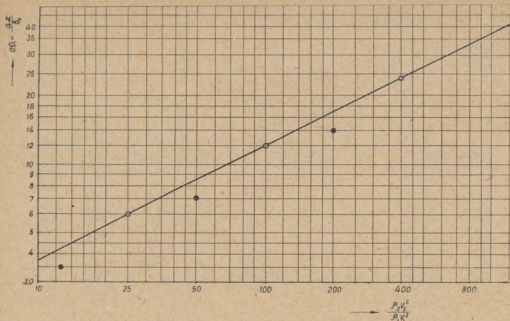
Кривые на фиг. 2, б относятся к холодным струям, а на фиг. 2, в к горячим струям при $\frac{T_2}{T_1} = 2$. Если сделать сравнение проекций скоростей вдоль оси горячей и холодной плоских струй при одинаковых отношениях скоростей, то видно, что горячие струи затухают быстрее. Из приведенных графиков фиг. 2 можно сделать вывод, что струя в потоке теряет скорость на оси тем быстрее, чем меньше отношение скоростей $\frac{v_2}{v_1}$ и чем больше отношение температур $\frac{T_2}{T_1}$.

Произведения из коэффициента структуры струй a на дальнобойность струй D_1 определяются из фиг. 2, б и 2, в как относительные расстояния $\frac{ax}{b_0}$ в местах пересечения кривых с пунктирными линиями, введенными на уровне проекции осевой скорости на ось x , составляющей 5% устьевой скорости. Значения aD_1 из шести кривых фиг. 2, б и 2, в сведены в таблицу 1.

Таблица 1

	$\frac{T_2}{T_1} = 1$			$\frac{T_2}{T_1} = 2$		
$\frac{v_2}{v_1}$	20	10	5	20	10	5
aD_1	24	12	6	14	7,7	3,5

Табличные значения aD_1 представлены в зависимости от параметра $\frac{\varrho_2 v_2^2}{\varrho_1 v_1^2}$ в логарифмическом масштабе на фиг. 3. Экспериментальные точки струй, выходящих из сопел с $\frac{h_1}{b_0} = 33$ и 44,5, укладываются на одну прямую. Значения aD_1 струй, выходящих из сопел с $\frac{h_1}{b_0} = 10$, получились меньше на $\sim 20\%$. Это расхождение объясняется тем, что струи, выходящие из сопел с отношением сторон $\frac{h_1}{b_0} = 10$, затухают быстрее, чем струи, выходящие из более вытянутых сопел. Значения дальнобойностей струй, выходящих из этих сопел, приведены потому, что в нашем распоряжении не было других опытов при $\frac{T_2}{T_1} = 2$. В то же время опыты с горячими струями характерны тем, что они в основном подчиняются той же зависимости от параметра $\frac{\varrho_2 v_2^2}{\varrho_1 v_1^2}$, как и холодные струи. Учитывая, однако, что нас интересуют дальнобойности плоских вытянутых струй, прямая на фиг. 3 проведена по точкам, относящимся к струям, выходящим из сопел с $\frac{h_1}{b_0} = 33$ и 44,5.



Фиг. 3. Дальность плоских струй при $\alpha = 90^\circ$ в зависимости от соотношения скоростных напоров струи и потока

Представленная в логарифмической сетке на фиг. 3 зависимость показывает, что значения aD_1 струй укладываются на прямую с показателем степени 0,5. Так как опыты проводились со струями, имеющими широкий диапазон изменения значения коэффициента структуры, то можно рекомендовать формулу для определения дальности плоских вытянутых струй с различными коэффициентами структуры в виде

$$aD_1 = k_2 \frac{v_2}{v_1} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности $k_2 = 1,2$ при угле атаки $\alpha = 90^\circ$.

Коэффициент пропорциональности для струй, ориентированных под углом $\alpha = 120^\circ$, можно определить из кривых фиг. 2, г. Так, при $\frac{v_2}{v_1} = 20$ получается $aD_1 = 22$, при $\frac{v_2}{v_1} = 10$ имеем $aD_1 = 11$. Подставляя эти значения в формулу (2), получим при угле атаки $\alpha = 120^\circ$ значение $k_2 = 1,1$. В опытах с круглыми соплами ⁽⁵⁾ максимальной дальностью обладали струи с углом атаки $\alpha = 90^\circ$, так что полученное в этих опытах уменьшение дальности при $\alpha = 120^\circ$ находится в полном соответствии с результатами вышеуказанной работы.

Траектории плоских струй

Основной задачей данного исследования, как уже было сказано выше, являлось экспериментальное определение уравнения траекторий плоских струй, развивающихся во внешнем поперечном потоке.

Исходя из того, что струи при $\frac{h_1}{b_0} = 10$ затухают быстрее вытянутых

$\frac{\varrho_1 v_1^2}{\varrho_2 v_2^2}$	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$	α	b_0	v_2	v_1	t_2	t_1	x	y	$\frac{x}{b_0}$
—	—	—	град	мм	м/сек			°C	мм	—	—
0,04	5	1	90	2,7	19,3	3,86	25	25	$\left\{ \begin{array}{l} 37 \\ 64 \\ 89 \\ 120 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7 \\ 23 \\ 48,8 \\ 100 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 13,7 \\ 23,7 \\ 32,9 \\ 44,5 \end{array} \right.$
0,02	7,1	1	90	2,7	27,3	3,86	28	25	$\left\{ \begin{array}{l} 47 \\ 84 \\ 132 \\ 175 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5,5 \\ 24,5 \\ 65,5 \\ 147,0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 17,4 \\ 31,1 \\ 48,9 \\ 64,8 \end{array} \right.$
0,01	10	1	90	2,7	38,6	3,86	30	25	$\left\{ \begin{array}{l} 80 \\ 122 \\ 162 \\ 225 \\ 275 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 9,5 \\ 26,0 \\ 49,0 \\ 116,5 \\ 206,5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 29,6 \\ 45,1 \\ 60,0 \\ 83,2 \\ 101,8 \end{array} \right.$
0,0025	20	1	90	0,9	77,8	3,89	26	25	$\left\{ \begin{array}{l} 30 \\ 50 \\ 70 \\ 100 \\ 156 \\ 205 \\ 280 \\ 365 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,5 \\ 2,3 \\ 5,0 \\ 12,0 \\ 39,0 \\ 81,5 \\ 185,5 \\ 400,0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 33,4 \\ 55,5 \\ 77,8 \\ 111,1 \\ 173,5 \\ 228,0 \\ 311,0 \\ 406,0 \end{array} \right.$
0,01	10	1	90	0,9	38,9	3,89	25	25	$\left\{ \begin{array}{l} 15 \\ 30 \\ 50 \\ 70 \\ 98,5 \\ 138 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,75 \\ 39,5 \\ 9,0 \\ 18 \\ 48,8 \\ 117 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 16,7 \\ 33,4 \\ 55,6 \\ 77,8 \\ 109,4 \\ 153,3 \end{array} \right.$

плоских струй, мы определяем уравнение траекторий струй из опытов с соплами $\frac{h_1}{b_0} = 33$ и 44,5. Данные этих опытов приведены в таблице 2.

Обработка траекторий струй этих опытов сделана согласно предложению Г. Н. Абрамовича ^(1,2) в координатах

$$\frac{ax}{b_0}, \quad \frac{ay}{b_0}.$$

Полученные кривые показывают, что траектории струй с различной начальной турбулентностью введением коэффициента структуры a обобщаются в единые кривые. Так, например, кривая 3 на фиг. 4 образована точками опытов со струями $a = 0,08$ и 0,12 при $\frac{h_1}{b_0} = 33$ и 44,5.

Уравнение траектории струи при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ будем искать в виде степенной зависимости:

$$\frac{ay}{b_0} = c \left(\frac{\varrho_1 v_1^2}{\varrho_2 v_2^2} \right)^m \left(\frac{ax}{b_0} \right)^n. \quad (3)$$

Для нахождения постоянных c , m и n в уравнении (3) на фиг. 5 перестроены в логарифмической сетке графические зависимости фиг. 4.

$\frac{y}{b_0}$	$\frac{v_m}{v_0}$	φ	$\frac{v_m - v_1}{v_0 - v_1}$	$\frac{ax}{b_0}$	$\frac{ay}{b_0}$	a	$\frac{h_1}{b_0}$	$\cos \varphi$	$\frac{v_m}{v_0} \cos \varphi$
—	—	град	—	—	—	—	—	—	—
2,59	0,771	16	0,714	1,64	0,31	0,12	33	0,961	0,74
8,51	0,546	36	0,434	2,85	1,02			0,809	0,44
18,1	0,429	52	0,286	3,95	2,17			0,616	0,264
37,0	0,326	63	0,156	5,34	4,44			0,454	0,148
2,04	0,69	14	0,637	2,09	0,24	0,12	33	0,970	0,67
9,08	0,436	25	0,342	3,73	1,09			0,906	0,395
24,2	0,294	52	0,177	5,87	2,91			0,616	0,181
54,5	0,22	63	0,09	7,78	6,54			0,454	0,099
3,52	0,525	12	0,472	3,55	0,42	0,12	33	0,978	0,512
9,63	0,358	26	0,288	5,41	1,16			0,899	0,322
18,34	0,271	40	0,190	7,26	2,18			0,766	0,207
43,1	0,095	57	0,106	10,0	5,18			0,545	0,106
76,5	0,159	67	0,065	12,2	9,18			0,391	0,062
—	—	2	—	2,67	0	0,08	44,5	0,999	—
2,5	0,516	7	0,505	4,44	0,20			0,993	0,512
5,55	0,408	9	0,376	6,23	0,444			0,948	0,404
13,32	0,302	14	0,265	8,89	1,065			0,970	0,293
43,4	0,189	31	0,146	13,87	3,47			0,857	0,162
90,6	0,131	50	0,087	18,23	7,25			0,643	0,084
206,0	0,088	66	0,040	24,9	16,48			0,407	0,036
445,0	0,068	82	0,019	32,4	35,5			0,139	0,009
0,83	0,89	1	0,868	1,33	0,067	0,08	44,5	0,999	0,889
3,61	0,584	10	0,532	2,67	0,289			0,985	0,575
10,0	0,414	22	0,345	4,45	0,80			0,927	0,334
20,0	0,302	32	0,223	6,23	1,6			0,848	0,256
54,2	0,206	55	0,117	8,75	4,33			0,574	0,118
130,0	0,147	—	0,052	12,25	10,4			—	—

На фиг. 5 видно, что опытные точки, характеризующиеся одинаковыми значениями параметра $\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$, располагаются на одной прямой, и прямые

с разными значениями $\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$ являются параллельными между собою.

По наклону этих прямых устанавливаем, что показатель степени $n = 2,5$.

Дальнейшей обработкой этих графиков на фиг. 6 получаем $c = 1,9$ и $m = 1$.

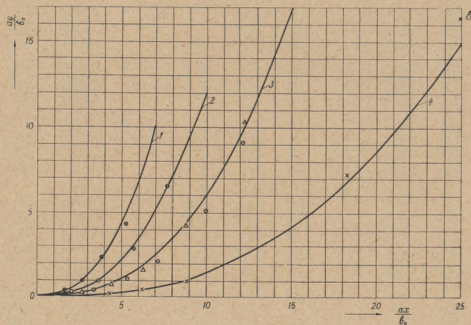
Итак, уравнение траекторий плоских струй, при угле атаки $\alpha = 90^\circ$, развивающихся во внешнем поперечном потоке, будет иметь вид:

$$\frac{ay}{b_0} = 1,9 \frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2} \left(\frac{ax}{b_0} \right)^{2,5}. \quad (4)$$

На фиг. 7 проведено сравнение траекторий струй, полученных по уравнению (4), с экспериментальными точками всех опытов.

Рассматривая графики траекторий струй (фиг. 7), можно сделать следующие выводы:

1. Плоские струи, выходящие из сопел с $\frac{h_1}{b_0} = 10$, подчиняются тому же уравнению (4), но, как правило, они лежат несколько выше, чем точки, полученные в опытах с соплами $\frac{h_1}{b_0} = 33$ и 44,5. Объясняется это, как уже было сказано, большим затуханием струй, выходящих из сопел с отношением сторон $\frac{h_1}{b_0} < 30$.



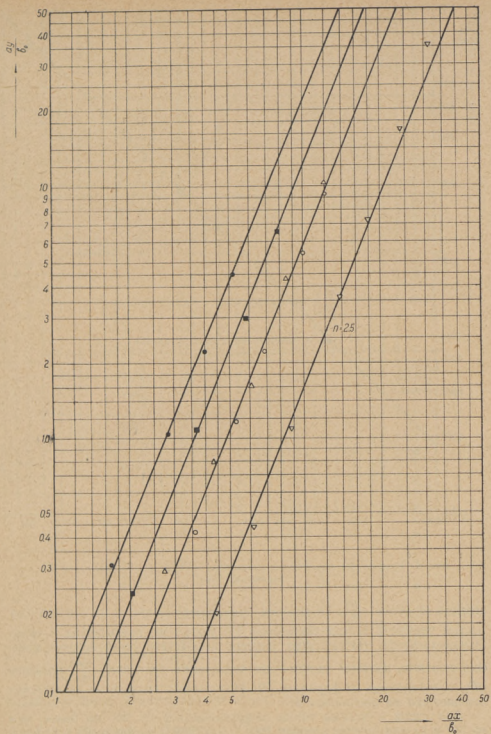
Фиг. 4. Траектории плоских струй при $\alpha = 90^\circ$ ($\frac{h_1}{b_0} = 33$ и 44,5)

2. Плоские струи вытянутой формы (при $\frac{h_1}{b_0} \geq 30$), развивающиеся в однородном внешнем потоке, можно также, как плоские свободные струи (т. е. струи, вытекающие в неподвижное пространство тех же физических свойств), обобщать по b_0 .

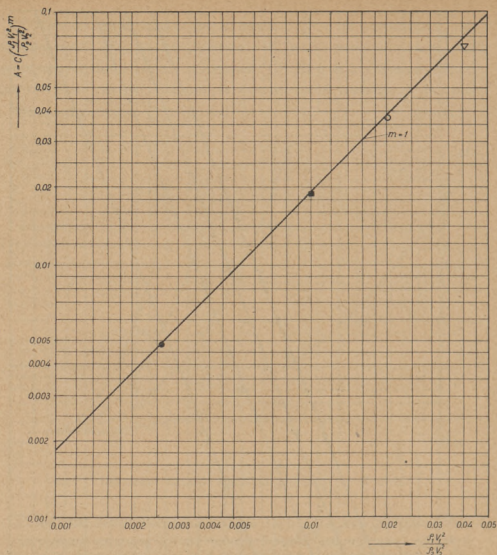
3. Общим для каждой кривой является параметр $\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$. Действительно, большинство кривых объединяет экспериментальные точки различных опытов с холодными и горячими струями, проведенных при различных отношениях скоростей. Важно только абсолютное значение этого параметра, несмотря на то, что он составлен из различных комбинаций входящих в него величин. Таким образом, целесообразность введения этого параметра подтвердилась опытами.

4. Полученное уравнение (4) можно считать проверенным в интервале значений параметра $\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$ от 0,0025 до 0,08 и значений a от 0,08 до 0,12.

При пользовании уравнением (4) для расчета траекторий струй острого дутья в топке предлагается ограничить применение его до рас-



Фиг. 5. График для определения показателя степени n в уравнении (3)

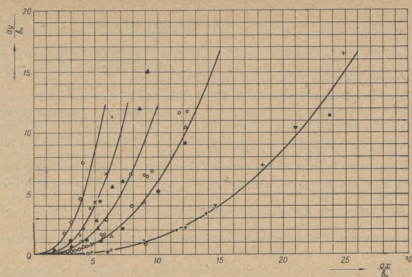


Фиг. 6. График для определения показателя степени m и коэффициента c в уравнении (3)

стояния от устья $\frac{ax}{b_0}$, на котором превышение скорости на оси над скоростью внешнего потока составляет 5% такого же превышения в устье. Предполагается, что при этом условии воздействие струй острого дутья еще ощутимо, поэтому практически предельным значением $\frac{ax}{b_0}$ является aD_1 , определяемое из формулы (2). При расчете воздушных завес таких ограничений не предлагается.

Для струй с углами атаки, отличающимися от 90° не более, чем на 30° в ту или другую сторону ($60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$), по аналогии с работой (5) можно рекомендовать уравнение траекторий струй в виде:

$$\frac{ay}{b_0} = 1,9 \frac{v_1 v_1^2}{v_2 v_2^2} \left(\frac{ax}{b_0} \right)^{2,5} - \frac{ax}{b_0} \operatorname{tg}(\alpha - 90^\circ). \quad (5)$$



Фиг. 7. Траектории плоских струй при $\alpha = 90^\circ$ ($\frac{h_1}{b_0} = 10; 33$ и $44,5$)

Таблица условных обозначений к фиг. 7

№№ кривых	$\frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2}$	$\frac{v_2}{v_1}$	$\frac{T_2}{T_1}$	a	$\frac{h_1}{b_0}$	Условные обозначения
1	0,08	5	2	0,12	10	○
2	0,04	5	1	0,12	33	●
		5	1	0,12	10	×
3	0,02	7,1	1	0,12	33	○
		10	2	0,12	10	▲
4	0,01	10	1	0,08	44,5	△
		10	1	0,12	33,0	●
		10	1	0,12	10,0	○
5	0,0025	20	1	0,08	44,5	+
		20	1	0,12	10,0	▼

Уравнение верно в интервале $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$

при $0 \leq \frac{ax}{b_0} \leq aD_1$ и $0,0025 \leq \frac{\rho_1 v_1^2}{\rho_2 v_2^2} \leq 0,08$.

Второй член правой части уравнения (5) добавлен в качестве величины, учитывающей влияние угла атаки. Например, при отсутствии внешнего потока первый член правой части уравнения (5) равен нулю

(так как $v_1 = 0$) и траектории струй, ориентированные под разными углами атаки α , описываются вторым его членом.

По уравнению (5) можно рассчитывать траектории плоских струй острого дутья в топках, воздушных завес, применяемых в вентиляционно-отопительной технике, и в ряде других случаев.

Приведем несколько примеров применения полученного уравнения для численных расчетов и используем их для сравнения с расчетами по существующим аналитическим работам. Из существующих современных аналитических работ возьмем решения И. К. Наймарка ⁽⁸⁾, И. А. Шепелева ⁽⁹⁾ и С. Е. Бутакова ⁽⁴⁾, основанные на совершенно различных методах подхода к рассматриваемому явлению. И. К. Наймарк предложил формулы для расчета траекторий струй острого дутья при заданной начальной скорости струи и направлении оси сопла. Выводы формулы основываются на закономерностях затопленных струй, которые в условиях топки искривляются под влиянием разности удельных весов вдвухаемого воздуха и горячих газов, а также благодаря воздействию на струю потока топочных газов.

Второй аналитической работой, с которой приводится сравнение, является аналитическое исследование И. А. Шепелева ⁽⁹⁾, опубликованное в 1947 г. В этой работе предлагается метод расчета воздушных завес. Функция тока завесы (как результат взаимодействия струи с набегающим потоком) может быть определена простым сложением функций тока струи и набегающего потока. Этот прием годится для потенциальных потоков и вряд ли можно предполагать применимость его для реальных воздушных потоков.

Третьей работой, с которой приводится сравнение, является аналитическое исследование С. Е. Бутакова ⁽⁴⁾. Последний считает, что существующие методы определения траектории воздушной завесы основаны на чисто кинематических соображениях, и указывает совершенно правильно, что такой подход не является единственно возможным.

Движение воздуха в проемах вызывается в основном ветром, который никогда не врывается непосредственно в проемы зданий. Он создает у ограждений зданий зоны повышенных и пониженных давлений, отличающихся от давления в помещении; разности давлений создают движение воздуха в проемах или выгибают оси перекрывающих их завес. Исходя из сказанного, С. Е. Бутаков предлагает метод расчета воздушных завес, в котором разность давлений рассматривается как основной фактор, обуславливающий выгиб завес. Однако, прежде чем рекомендовать этот способ для практического применения, автор считает необходимым его уточнить на основе экспериментов.

Сравнение экспериментальных данных проведенного исследования с вышеуказанными тремя аналитическими работами сделано на примерах, приведенных в табл. 3. Порядок расчетов по уравнению (5) для двух примеров приведен в табл. 4. Там же, в правой части таблицы, даны для сравнения координаты оси завесы x и y , взятые из аналитических работ ^(4,8).

Графическое сравнение траекторий струй, построенных по уравнению (5), с траекториями, определенными по аналитическим работам для приведенных в таблице 4 условий, сделано на фиг. 8, а; 8, б и 8, в.

На фиг. 8, а построены две траектории оси струи острого дутья, сплошная кривая по уравнению (5) и пунктирная кривая по уравнению И. К. Наймарка. Из сравнения кривых видно, что по уравнению И. К. Наймарка струя более дальнобойна.

Условные обозначения	Един. изм.	Данные	
		И. К. Наймарка	С. Е. Бутакова
Ширина щели, b_0	м	0,008	0,05125
Угол атаки струи, α	град.	120	120
Скорость струи в устье, v_2	м/сек	50	20
Скорость внешнего потока, v_1	м/сек	3,3	4,04
Температура струи, T_2	абс	550	293
Температура внешнего потока, T_1	абс	1800	293
Коэффициент структуры струи, a	—	0,1	0,2

Таблица 4

Примеры расчетов траекторий струй острого дутья и воздушных завес по уравнению (5)

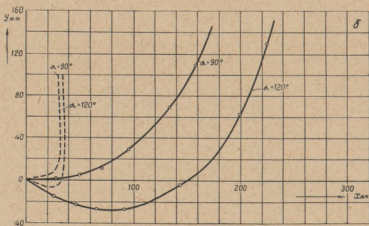
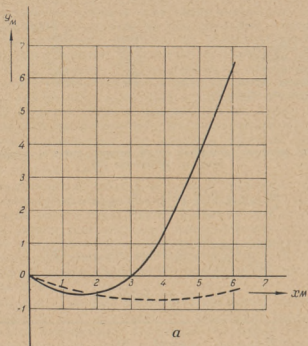
$$\frac{ay}{b_0} = 1,9 \frac{v_1 v_1^2}{v_2 v_2^2} \left(\frac{ax}{b_0} \right)^{2,5} - \frac{ax}{b_0} \operatorname{tg} (\alpha - 90^\circ).$$

Обозначим $1,9 \frac{v_1 v_1^2}{v_2 v_2^2} \left(\frac{ax}{b_0} \right)^{2,5} = A$; тогда при $\alpha = 120^\circ$

$$\frac{ay}{b_0} = A - 0,577 \frac{ax}{b_0}.$$

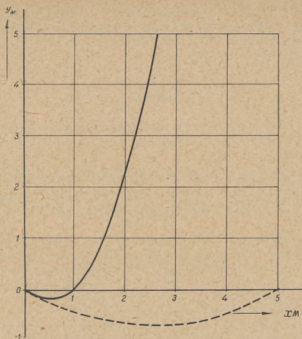
$\frac{ax}{b_0}$	$\left(\frac{ax}{b_0} \right)^{2,5}$	$1,9 \frac{v_1 v_1^2}{v_2 v_2^2}$	A	$0,577 \frac{ax}{b_0}$	$\frac{ay}{b_0}$	x	y	x	y
—	—	—	—	—	—	м	м	м	м
								По уравнению И. К. Наймарка	
2	5,65	0,00255	0,0144	1,15	—1,14	0,16	—0,091		
4	32,0		0,082	2,31	—2,30	0,32	—0,184		
6	88,5		0,226	3,46	—3,23	0,48	—0,259		
8	181		0,463	4,62	—4,16	0,64	—0,333		
10	316		0,81	5,77	—4,96	0,8	—0,397		
12,5	552		1,41	7,20	—5,79	1,0	—0,463	1,0	—0,355
25,0	2125		7,97	14,4	—6,43	2,0	—0,515	2,0	—0,619
37,5	8600		22,0	21,6	10,4	3,0	0,0032	3,0	—0,696
50,0	17625		45,2	28,9	16,3	4,0	1,31	4,0	—0,692
75,0	48500		124,0	43,3	80,7	6,0	6,47	6,0	—0,466
								По уравнению С. Е. Бутакова	
1	1,0	0,078	0,078	0,577	—0,50	0,256	—0,128		
2	5,65		0,44	1,15	—0,714	0,512	—0,183	0,5	—0,26
4	32,0		2,5	2,31	0,19	1,02	0,049	1,00	—0,462
5	55,0		4,29	2,88	1,41	1,28	0,36		
6	88,5		6,9	3,46	3,44	1,53	0,875		
7,8	170		13,3	4,5	8,8	2,00	2,25	2,00	—0,655
11,7	465		36,3	6,75	29,6	3,00	7,50	3,00	—0,70
15,6	960		75,0	9,00	66,0	4,00	16,9	4,00	—0,47
—	—		—	—	—	—	—	5,0	0

Сравнение экспериментальных данных с аналитической работой И. А. Шепелева приведено на фиг. 8, б. Кривые построены для двух случаев, $\alpha = 90^\circ$ и 120° . Как видно из графика, траектория струи, построенная по данным аналитической работы И. А. Шепелева (пунктирная кривая), проходит ближе к фронтальной стене, чем экспериментальная кривая.



Фиг. 8. Сопоставление траекторий плоских струй, построенных по уравнению (5) с траекториями определенными аналитическим путем

- a** — по уравнению (5)
 --- по теории И. К. Наймарка
- б** — по уравнению (5)
 --- по теории И. А. Шепелева



В

Фиг. 8. Сопоставление траекторий плоских струй, построенных по уравнению (5) с траекториями определенными аналитическим путем

— по уравнению (5)
 --- по теории С. Е. Бутакова

Траектория струи по уравнению С. Е. Бутакова нанесена на фиг. 8, в пунктирной линией, а по уравнению (5) — сплошной. Как видно из графика, расхождение кривых столь же значительно, как и при сравнении с двумя вышеупомянутыми аналитическими работами.

Из приведенного сравнения видно, что траектория плоской струи, подсчитанная по уравнению (5), занимает промежуточное положение между траекториями, построенными по работе И. А. Шепелева, с одной стороны, и И. К. Наймарка и С. Е. Бутакова — с другой. Из предложенных аналитических методов определения траектории струи в потоке предпочтение следует отдать методу С. Е. Бутакова.

Результаты проведенного экспериментального исследования дают основание предполагать, что траектория струи изгибается под воздействием усилия, которое оказывает скоростной напор набегающего потока (ρv^2). Расхождение экспериментальной траектории с расчетной по предложенному С. Е. Бутаковым методу можно объяснить недоучетом некоторых факторов при аналитическом решении. Так, например, затухание струи в потоке взято по закону свободной струи, а по нашим экспериментальным данным видно, что струя в потоке затухает значительно быстрее, чем при затопленном истечении. Затем подсос воздуха с обеих сторон завесы принят одинаковым, в то время как изогнутая струя с внешней и с внутренней стороны взаимодействует с потоком различно. Если этот метод уточнить на основании эксперимента, как и предполагал автор, то им, возможно, удастся пользоваться при практических расчетах.

На основании данного экспериментального исследования остальные методы решения, основанные на кинематических соображениях, можно считать неоправдавшими себя, так как они не отражают механизма взаимодействия струи и потока.

Выводы

1. В результате проведенного экспериментального исследования получено расчетное уравнение ⁽⁵⁾ траекторий плоских струй острого дутья и воздушных завес.

При расчете струй острого дутья дальность струй следует определять по формуле (2).

При расчете воздушных завес предельное значение $\frac{ax}{b_0}$ зависит от условий задачи.

2. Падение скорости и температуры по оси струй, развивающихся во внешнем поперечном однородном потоке, происходит интенсивнее, чем у тех же струй, но распространяющихся в неподвижном пространстве.

3. Чем больше угол атаки струи, тем интенсивнее падает ее скорость и температура. При установке воздушных завес нельзя рекомендовать значения углов атаки, превышающие 120°.

4. Опыты подтвердили предположения Г. Н. Абрамовича о возможности обобщения струй, развивающихся в потоке, отнесением всех линейных размеров струи к полуширине струи в устье с учетом коэффициента их структуры.

5. Данные проведенной работы опровергают расчеты траекторий струй в потоке, основанные на различных методах сложения скоростей струи со скоростью потока.

6. Приведенные примеры расчета показывают удобство и простоту применения уравнения траекторий к практическим случаям.

Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
10 VI 1953

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Абрамович, Труды ЦАГИ, вып. 293, 1936.
2. Г. Н. Абрамович, Турбулентные свободные струи жидкостей и газов, 1948, стр. 200.
3. В. В. Батурий и И. А. Шепелев, Воздушные завесы, журнал «Отопление и вентиляция», № 5, 1936.
4. С. Е. Бутаков, Аэродинамика систем промышленной вентиляции, Профиздат, М., 1949, стр. 162—172.
5. Ю. В. Иванов, Уравнения траекторий струй острого дутья, КТС, № 8, 1952.
6. Ю. В. Иванов, Исследование траекторий холодных и горячих струй, распространяющихся в неограниченном однородном потоке, Диссертация, 1951.
7. Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин, Аэродинамика факела, вытекающего в среду другой плотности, ЖТФ, № 9, 1939.
8. И. К. Наймарк, К вопросу о расчете острого дутья, СКТС, № 7, 1939.
9. И. А. Шепелев, Воздушные завесы, Изд. НИИЛ, 1947.
10. И. А. Шепелев, Основы расчета воздушных завес, приточных струй и пористых фильтров, Стройиздат, 1950.
11. R. F. Davis, The Mechanics of Flame and Air Jets, „Engineering”, Vol. 144, No 3750—3752, 1937, p. 608—610 and 667—668.