

АЭРОДИНАМИКА СТРУЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ УСТЬЯ

Ю. В. ИВАНОВ,

кандидат технических наук

Наиболее распространенным видом применения струй в технических аппаратах является организация смесительных процессов. Но по вопросу об аэродинамике струй различной формы устья до сих пор существуют различные точки зрения. Одни авторы полагают, что при организации острого дутья в топках предпочтительнее струи круглой формы, другие, наоборот, считают, что при одном и том же сечении струя из прямоугольного сопла обладает большей дальностью, но меньшей эжекционной способностью, чем круглая струя^[13]. Все же на практике широко применяются струи самых различных форм устья, как, например, кольцевые (труба в трубе), эллипсоидальные (сплюснутые круглые трубы), треугольные и прямоугольные с различным отношением сторон в устье.

Задача о распространении струи может считаться уже решенной только для струй круглой и плоской (вытянутой) форм устья, вытекающих в неподвижное пространство. Для других случаев нет теоретических решений и имеется мало экспериментального материала. Для наиболее часто встречающегося на практике случая, когда струя развивается в потоке, имеются опытные материалы, которые касаются либо аэродинамики струй круглой^[3], либо плоской вытянутой форм^[4].

В данной работе делается попытка рассмотреть имеющиеся экспериментальные материалы по влиянию различных форм устья на распространение струи в неподвижной среде и освещаются собственные экспериментальные материалы автора по аэродинамике струй, развивающихся в равномерном поперечном потоке.

Струи, развивающиеся в неподвижной среде

Исследованию струй, выходящих из отверстий круглой формы, посвящено несколько десятков работ, проводившихся как у нас, так и за границей. Из всех этих работ упомянем только о двух. О первом проведенном в нашей стране исследовании аэродинамики круглых струй, опубликованном в 1913 г. В. Слесаревым^[9], можно сказать, что оно изобилует остроумными приемами как в постановке опытов, так и в методике их проведения. Оригинальны способы нагрева воздуха, регулирования его температуры, а также метод измерения осевой температуры. Второй работой по струям, которую необходимо выделить как серьезное аналитическое решение задачи о закономерностях развития струй и наиболее полное обобщение экспериментального материала о струях, вытекающих в неподвижную среду, является работа Г. Н. Абрамовича^[11]. В этой работе впервые дано приложение теории струи к решению ряда прикладных вопросов.

Первые исследования струй прямоугольной формы были опубликованы В. А. Туркусом [14] в 1935 г. Им были проведены подробные измерения скоростных полей струй по двум взаимно перпендикулярным диаметрам на различных расстояниях от устья. Вблизи устья скоростные поля резко различались, а по мере увеличения расстояния от него это расхождение сглаживалось. Из этих опытных данных можно сделать вывод, что на пути движения струи все время происходит перестройка ее скоростного поля. Затухание скорости вдоль оси струй, выходящих из прямоугольного сечения одинаковой высоты, но различной ширины, происходит различно: чем меньше ширина струи, тем быстрее затухает ее осевая скорость. Но В. А. Туркусом не было сделано никакого обобщения экспериментального материала.

К работам, рассматривающим влияние формы устья струи на ее аэродинамику, можно отнести работу П. М. Масловского [7]. В ней делается попытка обобщения экспериментальных данных, относящихся к струям, вытекающим из отверстий различной формы, по гидравлическому диаметру d_r выходного сечения струи в устье ($d_r = 4F/S$, причем F — периметр, а S — площадь поперечного сечения устья струи). Высказывается предположение, что если кривые изменения скоростей вдоль оси струй различных диаметров построить в относительных координатах с учетом гидравлического диаметра, то можно будет получить единую обобщенную кривую, универсальную для струй различных форм устья.

Однако, такое предположение нельзя считать в достаточной мере состоятельным. Известно, что понятие гидравлического диаметра широко используется для характеристики течений в закрытых каналах и трубопроводах некруглого сечения, в особенности при подсчете сопротивлений; на самом же деле сопротивление движению в канале зависит не только от размеров площади поперечного сечения канала, но и от величины его поверхности, учитываемой периметром, входящим в гидравлический диаметр. В противоположность этому развитие струй не связано ни с какими ограничивающими стенками и струя на всем своем пути от устья остается свободной.

Различие между этими двумя видами движения — в закрытом канале и в свободной струе — настолько очевидно, что возникают законные сомнения в допустимости использования для характеристики течения одной и той же величины d_r .

С. Б. Старк [12] обработал экспериментальные данные по струям различных форм, используя гидравлический диаметр; как и следовало ожидать, единого обобщения струй не получилось.

При исследовании струй острого дутья на моделях в ЦКТИ Д. Н. Ляховским, С. Н. Сыркиным и А. К. Сидоровым [5, 6] впервые упоминается об использовании эквивалентного диаметра струй $d_э$ в качестве характерного размера. Исследуя траектории струй круглой, квадратной и прямоугольной форм, они сопоставляли их между собой по эквивалентному диаметру, т. е. диаметру круга, равного по площади устью сопла:

$$d_э = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}}, \quad (1)$$

где F_0 — площадь поперечного сечения устья струи:

Необходимо при этом все же отметить, что в этой работе при обобщении траекторий струй удалось получить единую кривую только для струй круглой и квадратной форм устья. Струи прямоугольной формы оказались более дальнобойными.

Опыты, описанные в работах [5, 6], проводились в очень узком канале и, по-видимому, эта особенность канала сказалась на поведении прямоуголь-

ных продольных струй. Все же можно полагать, что введение эквивалентного диаметра $d_э$ является правильным и представляет существенный шаг вперед по сравнению с обобщением струй по гидравлическому диаметру.

При прочих равных условиях импульс струи в устье определяется именно эквивалентным диаметром струи в устье.

Следующей работой по обобщению струй различных форм является работа И. О. Замази^[2], выполненная также в ЦКТИ. Работа проводилась с целью установления закономерностей струи, выходящей из кольцевого сечения (типа труба в трубе) при различных значениях отношения диаметров d_0/d (где d_0 — наружный диаметр внутренней трубы, а d — внутренний диаметр наружной трубы). В этих опытах, проведенных в автомоделной области турбулентного режима, струя подавалась только по кольцевому сечению, а внутренняя труба была закрыта вставкой. Исследования были начаты опытами с круглой струей ($d_0/d=0$), закономерности которой хорошо изучены, и были продолжены до $d_0/d=0,786$. При проведении опытов производились подробные измерения полей скоростей струи по шести радиусам в различных сечениях на разных расстояниях от устья.

Экспериментальное исследование показало, что чем больше значение параметра d_0/d , тем быстрее затухает осевая скорость струи. Предложенной И. О. Замази обработкой удалось экспериментальные данные по затуханию осевой скорости струй во всем исследованном интервале изменения параметра d_0/d уложить на одну универсальную кривую, построенную в координатах $v/v_э$ и x/d . Вся суть этой обработки заключается в замене кольцевой струи эквивалентной круглой струей, т. е. струей, имеющей в устье эквивалентную скорость

$$v_э = v_y \sqrt{1 - \left(\frac{d_0}{d}\right)^2}. \quad (2)$$

Для круглой струи ($d_0/d=0$) за v_y принимается скорость на оси струи в устье. В этой же работе^[2] приведена формула для расчета увеличения расхода факела вдоль его оси.

Исследование струй, выходящих из кольцевого сечения (так называемых полых факелов), нашло свое развитие в работах С. Б. Старка^[10, 11]. Этими работами подтверждено предложение И. О. Замази по обобщению кольцевых струй и сделано дальнейшее развитие на тот случай, когда, помимо потока по внешнему кольцу, имеется и центральный поток. В работе делается дополнительное предложение, позволяющее уточнить обработку опытных данных путем введения коэффициентов скоростных полей внешнего и внутреннего потоков.

Установленное опытами подобие полей поперечных скоростей основного участка факела, а также совпадение полученного единого профиля с универсальным профилем круглой струи позволило использовать понятие эквивалентной струи. Начальное количество движения такой эквивалентной струи приравнивается суммарному начальному количеству движения обоих потоков. Скоростные поля эквивалентной струи на одинаковых расстояниях от устья будут такими же, как и поля исследуемого факела. В этих же работах^[10, 11], решена задача о процессах перемешивания в факеле, состоящем из двух концентрических потоков, характеризующихся концентрацией вещества основного потока в различных сечениях факела.

Исследования И. О. Замази^[2] и С. Б. Старка^[10, 11] достаточно обстоятельно показали, что аэродинамика полого факела, вытекающего из кольцевого сечения, может рассчитываться по известным закономерностям свободной круглой струи.

Закономерности струй эллипсоидальной формы устья частично рассмотрены в работе В. И. Миткалинного^[18], исследовавшего взаимодействие

соизмеримых струй. Изучая движение двух параллельных струй, разнесенных между собой на некоторое расстояние в устье, В. И. Миткалинский обнаружил, что на некотором расстоянии от выхода обе струи сливались в одну струю эллипсоидальной формы. В результате подробных измерений было установлено, что струи эллипсоидальной формы по мере удаления от устья переходят в струю круглой формы. Если ввести понятие о эквивалентном диаметре или о эквивалентной струе, то струи эллипсоидальной формы также можно рассчитывать по известным закономерностям свободной круглой струи.

В следующей работе [12] С. Б. Старк привлекает имеющиеся материалы по струям и, используя свои исследования, показывает возможность обобщения струй различной формы по эквивалентному диаметру. В работе [12] рассмотрены струи, вытекающие в неподвижную среду из отверстий круглой, квадратной и треугольной форм, и показана возможность путем введения эквивалентного диаметра струй $d_э$, привести все эти струи к круглой струе, имеющей такое же количество движения.

Диаметр эквивалентной круглой струи $d_э$ при этом определяется из уравнения баланса количества движения

$$F_0 v_{\text{ср}} \frac{\pi d_э^2}{4} v_э^2, \quad (3)$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость в выходном сечении и $v_э$ — выходная скорость эквивалентной струи.

Поскольку в подавляющем большинстве случаев скоростное поле струи в устье неравномерно, то предлагается учесть это коэффициентом и считать $v_{\text{макс}} = k_v v_{\text{ср}}$, где k_v — коэффициент скоростного поля, определяемый экспериментально.

Подставляя соответствующие величины в уравнение баланса количества движения и принимая максимальные выходные скорости одинаковыми, можно написать

$$d_э = \frac{k_э}{k_v} \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}}, \quad (4)$$

где $k_э$ — принимаемый коэффициент поля эквивалентной струи.

Предполагая, что скоростное поле эквивалентной струи равномерно, последняя формула примет вид

$$d_э = \frac{1}{k_v} \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}}. \quad (5)$$

Приведем на рис. 1 график, заимствованный из работы С. Б. Старка [12]. На нем видны экспериментальные точки, характеризующие затухание осевой скорости струй, вытекающих из отверстий круглой, квадратной и треугольной форм; обработка опытных данных по эквивалентному диаметру позволяет с достаточной точностью представить изменение осевой скорости всех струй в виде единой кривой, характерной для круглой струи. Поскольку решения для круглых струй известны и даже затабулированы, то может считаться решенной задача о развитии в неподвижной среде струй таких форм, как кольцеобразная, эллипсоидальная, треугольная, квадратная и прямоугольная с малыми значениями сторон в устье ($h_0/b_0 \leq 2$).

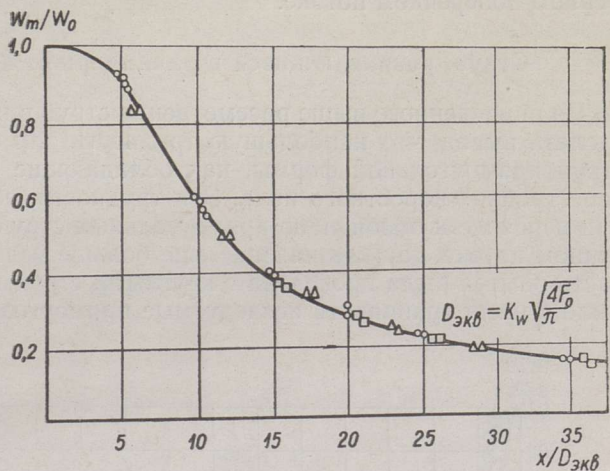
Перестройка скоростных полей таких струй заканчивается вблизи устья, примерно в 6—7 калибрах струи. Для прямоугольных струй с большим отношением сторон в устье процесс перестройки скоростных полей затягивается; согласно исследованиям [12], струя превращается сначала в прямоугольную со скругленными углами, далее в овальную и, наконец, в круглую.

В этой же работе [12] приводится график изменения формы сечения струи на различных расстояниях от устья. По нему можно непосредственно определить расстояние, на котором заканчивается перестройка струи при различных отношениях сторон устья.

Рис. 1.

Универсальная кривая затухания осевой скорости струй, вытекающих из отверстий правильной формы.

○ ○ ○ — круглое отверстие диаметром 41,5 мм;
 □ □ □ — квадратное отверстие 35 × 35 мм;
 △ △ △ — треугольное отверстие $a = 54$ мм.



Перестройка прямоугольных струй с отношением сторон в устье, например $h_0/b_0 = 5$, по этому графику продолжается до 40—50 калибров струи.

Для расчета падения температуры вдоль оси струи, вытекающей в неподвижную среду, рекомендуется воспользоваться уравнением баланса избыточного тепла, которое может быть написано в следующем виде:

$$\Delta t_{cp} v_{cp} F_0 = \frac{\pi d_3^2}{4} \Delta t_3 v_3, \quad (6)$$

где Δt — избыточная температура.

Вводя коэффициент температурного поля k_t и коэффициент скоростного поля k_v в выходном сечении исследуемой струи, связывают максимальные значения скоростей и температур с их средними значениями:

$$v_{max} = k_v v_{cp}; \quad \Delta t_{max} = k_t \Delta t_{cp}.$$

При условии равенства максимальных значений скоростей и избыточных температур, диаметр эквивалентной по количеству избыточного тепла круглой струи, имеющей равномерные начальные скоростное и температурное поля, рассчитывается по следующей формуле:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi k_v k_t}}. \quad (7)$$

Здесь коэффициенты k_v и k_t относятся к исследуемой струе. Расчет изменения температуры вдоль оси струи любой из рассмотренных выше форм устья сводится к определению диаметра круглой струи, эквивалентной по количеству избыточного тепла.

Все рассмотренное выше относится к струям, вытекающим в неподвижную среду.

Еще большее практическое значение может представить обобщение струй, развивающихся в движущемся потоке, в частности, в поперечном

потоке. По струям, распространяющимся в равномерном поперечном потоке, нет теоретических решений и очень мало экспериментальных данных. Поэтому нами было поставлено исследование с целью установления закономерностей струй различной формы устья, развивающихся в равномерном поперечном потоке.

Струи, развивающиеся в равномерном поперечном потоке

Из приведенного выше рассмотрения струй в неподвижной среде можно сделать вывод, что наибольшую трудность для обобщения представляют струи прямоугольной формы, как обладающие большой длиной участка перестройки скоростного поля. Эти трудности, естественно, не снимаются при переходе к обобщению прямоугольных струй, развивающихся в поперечном потоке, так как явление еще больше усложняется. В связи с этим часть опытов была проведена с круглыми струями для того, чтобы можно было с ними сравнивать исследуемые прямоугольные струи.

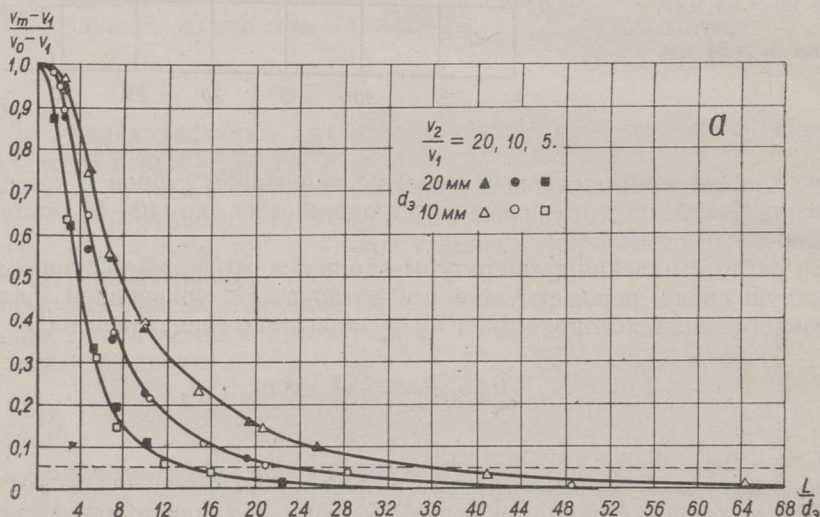


Рис. 2а. Изменение относительной разности скоростей вдоль оси прямоугольной поперечной струи при $\alpha = 90^\circ$ и $T_2/T_1 = 1$.

Струи прямоугольной формы имели отношение сторон в устье $h_0/b_0 = 5$, что уже достаточно для прямоугольных струй и не настолько велико, чтобы рассматривать такие струи как плоские (вытянутые). Применялись сопла с эквивалентными диаметрами в 20 и 10 мм. Опыты проводились на воздушной установке, представляющей собой вертикальный канал, по которому снизу вверх под напором вентилятора направлялся равномерный поток воздуха. Над верхним краем канала поток выходил в помещенные комнаты, образуя свободную струю сечением 480×600 мм. В этот свободный поток через съемное сопло прямоугольной или круглой формы подавалась в поперечном направлении воздушная струя от другого вентилятора большего напора. Струя подавалась в направлении большего размера канала (600 мм) и по мере своего движения в поперечном потоке отклонялась им вверх. С одной из меньших сторон поток ограничивался фронтальной стеной (высотой 1250 мм), служившей местом установки сопел.

Струи исследовались при трех отношениях скоростей — $v_2/v_1 = 20, 10$ и 5 , двух отношениях температур — $T_2/T_1 = 1$ и 2 , и двух углах атаки — $\alpha = 90$ и 120° . Прямоугольные струи ориентировались большей стороной

устья либо поперек потока, либо вдоль него. Соответственно будем называть их прямоугольными поперечными и прямоугольными продольными струями.

Исследовались траектории прямоугольных и круглых струй, их дальнотойность и изменение скорости и температуры вдоль оси струи в равномерном поперечном потоке. Все эти характеристики струй определялись на основании скоростных и температурных замеров. Измерение скорости по величине и направлению производилось трубкой с раздельным отбором статического давления, а угол поворота трубки считывался по лимбу. В работе были использованы термопары из нихрома и константа диаметром 0,1 мм. Максимальные ошибки при измерении составляли для скоростей 4%, а для температур 2%.

Постановка вопроса и методика исследования освещены достаточно полно в прежних работах автора [3, 4]. Введем только некоторые обозначения, нужные для представления результатов обработки опытных данных. Начало координатной системы поместим в центр устья струи.

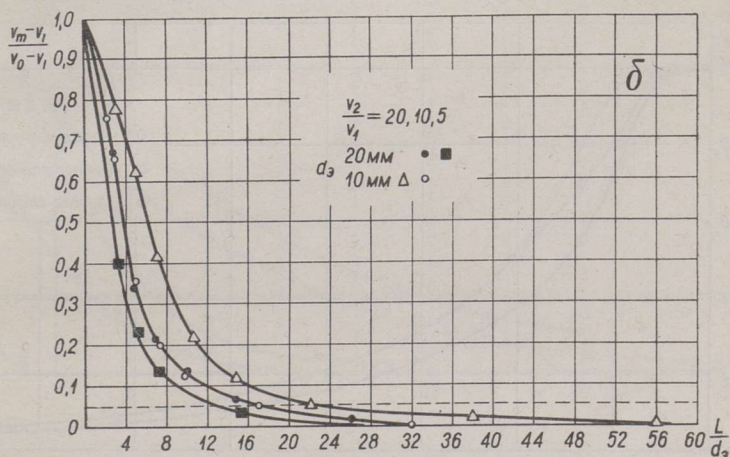


Рис. 26.

Изменение относительной разности скоростей вдоль оси прямоугольной поперечной струи при $\alpha = 90^\circ$ и $T_2/T_1 = 2$.

Горизонтальную ось в направлении струи обозначим через x , вертикальную — через y , а перпендикулярную им третью ось через z ; расстояние вдоль изогнутой струи обозначим через L , превышение максимальной скорости на оси струи (v_m) над скоростью основного поперечного потока (v_1) обозначим Δv_m , т. е. $\Delta v_m = v_m - v_1$, а превышение скорости струи в устье (v_0) над скоростью основного потока соответственно через Δv_0 , т. е. $\Delta v_0 = v_0 - v_1$; угол между направлением струи в устье и направлением основного потока назовем углом атаки струи и обозначим α (при $\alpha = 0$ потока двигались бы в одном и том же направлении, а при $\alpha = 180^\circ$ в противоположные стороны); угол между направлением вектора осевой скорости и горизонтальной осью x обозначим через φ .

На рис. 2 а, б в относительных координатах ($\Delta v_m/\Delta v_0$ и L/d_3) построены экспериментальные точки, характеризующие затухание осевой скорости прямоугольных поперечных струй (при $d_3 = 20$ и 10 мм), развивающихся в поперечном потоке ($\alpha = 90^\circ$) при отношениях скоростей $v_2/v_1 = 20, 10$ и 5 и отношениях температур $T_2/T_1 = 1$ и 2 . Введение эквивалентного диаметра позволило обобщить в единую струю струи разных размеров, но одинаковой формы: каждая кривая объединяет опытные точки прямоугольных струй двух размеров ($d_3 = 20$ и 10 мм).

Обращает также на себя внимание зависимость развития струи в поперечном потоке от отношения скоростей v_2/v_1 : изменение относительной

разности скоростей по оси струи происходит тем быстрее, чем меньше это отношение. При одинаковом же значении отношения v_2/v_1 изменение относительной осевой скорости происходит тем быстрее, чем больше величина отношения температур T_2/T_1 (рис. 2б).

Сравнение затухания осевой скорости струй различной формы при одинаковом отношении скоростей приведено на рис. 3. На нем в координатах $\Delta v_m/\Delta v_0$ и L/d_3 нанесены экспериментальные точки, характеризующие изменение осевой скорости изотермических прямоугольных и круглой струй при $v_2/v_1 = 20$. Из графика видно, что с помощью эквивалентного диаметра все же не удается представить одной кривой изменение осевой скорости поперечных и продольных струй. На всем основном участке струи от устья до 40 или 45 калибров продольная струя затухает медленнее поперечной. Изменение осевой скорости круглой струи на начальном участке происходит медленнее, чем для прямоугольных струй, а начиная примерно с 10 калибров на всем основном участке затухания круглой и прямоугольной продольной струй происходят одинаково.

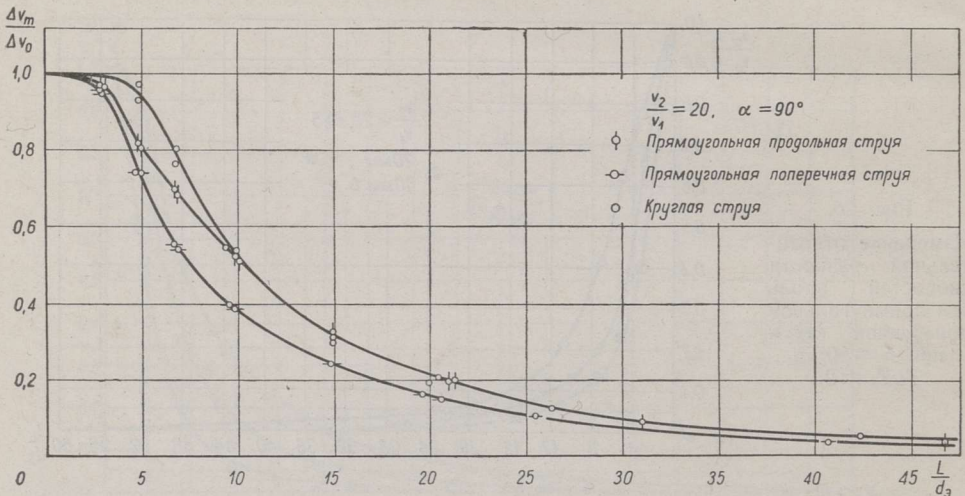


Рис. 3. Изменение разности скоростей вдоль осей изотермических струй разной формы при $v_2/v_1 = 20$ и $\alpha = 90^\circ$.

Из рис. 3 видно, что быстрее всех размывается прямоугольная поперечная струя, следовательно, она менее дальнобойна и представляет меньший интерес для организации острого дутья. Напомним, что под дальнобойностью струи D_1 понимается относительное расстояние x/d_3 по нормали от устья до того места на оси струи, где проекция осевой скорости на ось x составляет 5% от устьевой скорости v_0 , т. е. где $v_m \cos \varphi = 0,05 v_0$.

Дальнобойность прямоугольных поперечных и продольных струй может быть количественно определена из рис. 4, представляющего зависимость проекции осевых скоростей прямоугольных поперечных и продольных струй на ось x от относительного расстояния x/d_3 . Дальнобойности можно выписать как значения относительных расстояний x/d_3 , соответствующие местам пересечения кривых с пунктирной линией, отсекающей 5% от ординаты. Так, например, при $v_2/v_1 = 20$ и $T_2/T_1 = 2$ дальнобойность продольной струи имеет величину 27,5, а дальнобойность поперечной струи только 23.

Можно отметить, что если построить в логарифмической сетке график дальнобойности D_1 прямоугольных струй как функции от гидродинамического параметра $\rho_2 v_2^2 / \rho_1 v_1^2$, то получаются две параллельные прямые:

нижняя прямая для дальнобойности поперечных струй, а верхняя — для продольных струй, равных по дальнобойности круглым струям.

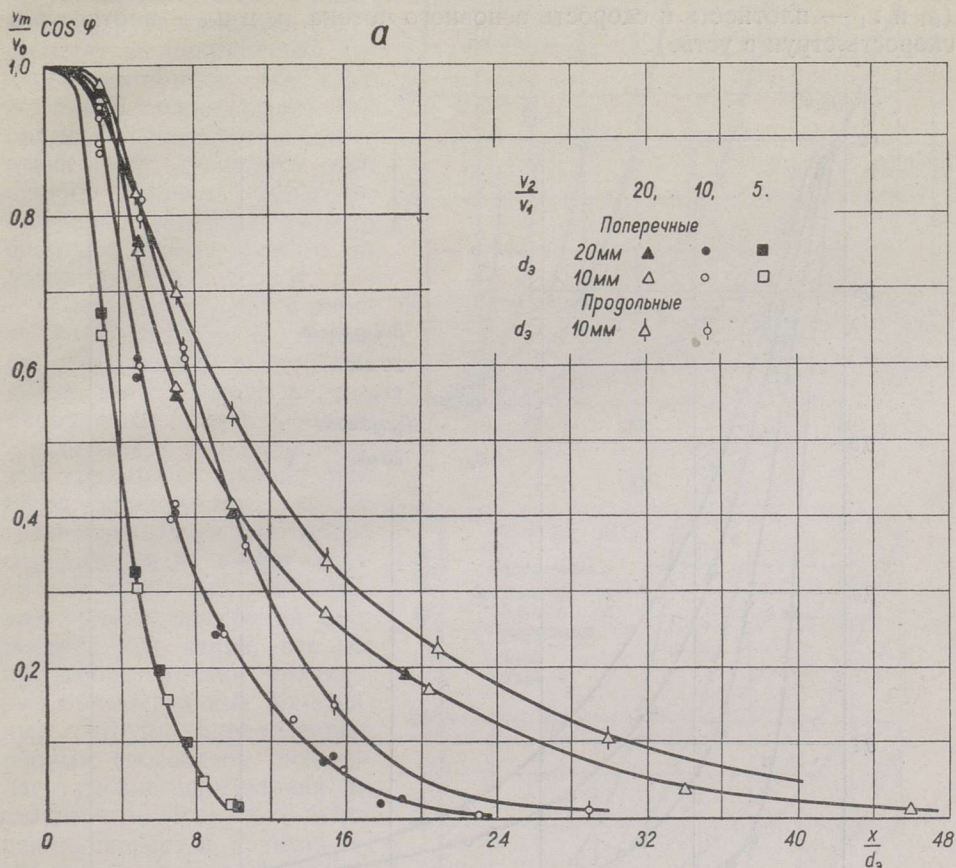


Рис. 4а. Изменение проекций осевых скоростей прямоугольных поперечных и продольных струй при $\alpha = 90^\circ$ и $T_2/T_1 = 1$.

Сравнение значений дальнобойностей прямоугольных поперечных и продольных струй показывает, что первые обладают примерно на 20% меньшим значением дальнобойности, чем продольные.

Из приведенных данных можно установить, что и для прямоугольных струй справедлив вывод, сделанный в свое время [31] для круглых струй, а именно: дальнобойность D_1 прямо пропорциональна отношению скоростей v_2/v_1 и обратно пропорциональна корню квадратному из отношения температур T_2/T_1 .

Подсчет значений дальнобойности прямоугольных холодных и горячих струй D_1 можно производить по формуле

$$D_1 = k \frac{v_2}{v_1} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}, \tag{8}$$

где k — опытный коэффициент. Для продольных струй $k \approx 2$, а для поперечных $\approx 1,6$.

Траектории прямоугольных струй. Аналогично круглым струям [31] траектории прямоугольных струй можно поставить в зависимость от гидродинамического параметра $\rho_1 v_1^2 / \rho_2 v_2^2$, угла атаки струй α , эквивалентного диаметра d_3 , а кроме того и от ориентации сопла большей или меньшей

стороной перпендикулярно направлению основного потока. Параметр $\rho_1 v_1^2 / \rho_2 v_2^2$ является отношением скоростных напоров потока и струи в устье (ρ_1 и v_1 — плотность и скорость основного потока, ρ_2 и v_2 — плотность и скорость струи в устье).

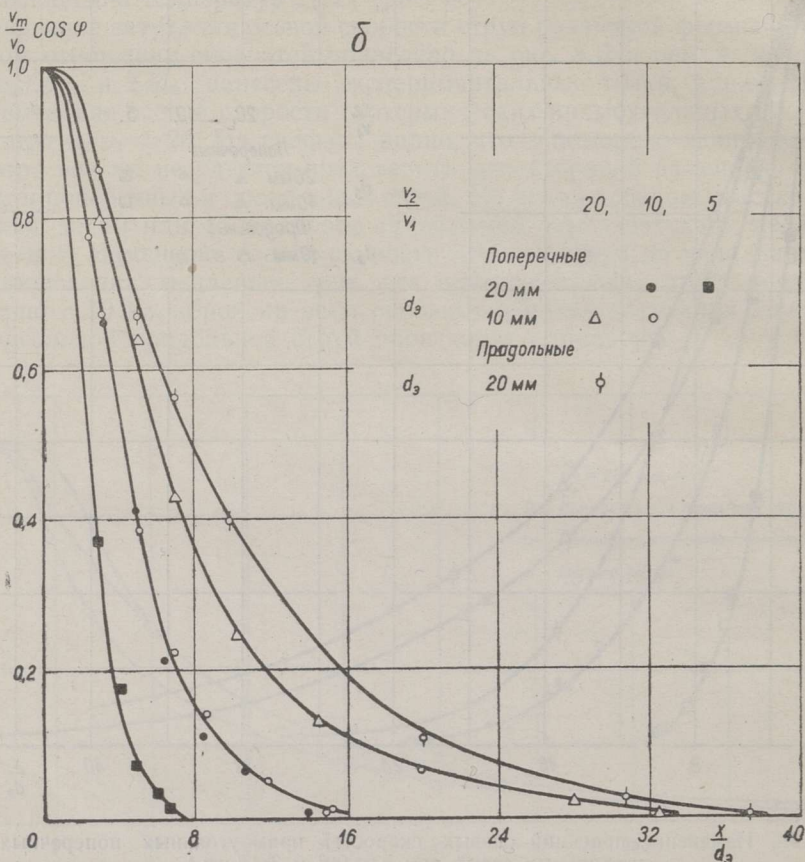


Рис. 4б. Изменение проекций осевых скоростей прямоугольных поперечных и продольных струй при $\alpha = 90^\circ$ и $T_2/T_1 = 2$.

Возможность обобщения траекторий струй одинаковой формы по эквивалентному диаметру проверялась опытным путем на прямоугольных и круглых струях при $d_3 = 20$ и 10 мм. Каждая кривая на рис. 5 объединяет экспериментальные точки, полученные при разных диаметрах. Траектории прямоугольных продольных струй, так же как и кривые затухания осевых скоростей этих струй, не совпадают с соответствующими линиями прямоугольных поперечных струй. Траектории струй одной и той же формы устья, построенные на этом рисунке, различаются между собой значениями гидродинамического параметра $\rho_1 v_1^2 / \rho_2 v_2^2$. На графиках можно видеть влияние отношений скоростей и температур на траектории струй: чем больше отношение скоростей v_2/v_1 и чем меньше отношение температур T_2/T_1 , тем дальше отстоят траектории струй от плоскости выхода.

На рис. 5б сделано сопоставление траекторий прямоугольных поперечных струй с прямоугольными продольными струями. Сравнение кривых показывает, что продольная струя обладает большей дальностью D , понимаемой как относительное расстояние x/d_3 по нормали от плоскости, в

которой находится устье струи, до плоскости, в которой изогнутая вначале струя выходит на направление поперечного потока. На этом же рис. 5 можно видеть, что прямоугольная струя с углом атаки 120° обладает, при прочих равных условиях, большим значением дальности D , чем струя с углом атаки 90° .

Траектории струй в работе определялись не только по измерениям скоростных полей, но и по фотографиям окрашенных струй. Средняя линия между верхней и нижней границами окрашенной струи принималась за ее траекторию. Хотя этот способ определения не может сравниться по точности с методом прямых измерений скоростной оси струи, все же при сопоставлении траекторий прямоугольных поперечных струй, определенных обоими способами, получалась удовлетворительная их сходимость. Поскольку измерения скорости и температуры струй в потоке являются весьма затруднительными и трудоемкими, то начинает широко использоваться метод фотографирования окрашенных потоков. В связи с этим будет полезным отметить, что траектории поперечных струй, определенные на основании фотографий, хорошо совпадали с траекториями, определенными по скоростным полям. В то же время траектории круглых и продольных струй, определенные по фотографиям, как правило, оказывались круче траекторий, измеренных по скоростным полям. Объясняется это двумя причинами, которые в работе необходимо всегда учитывать. Во-первых, вследствие деформации струи под влиянием внешнего потока скоростная ось проходит не по центру струи, а несколько ниже ее (ближе к набегающему потоку). Во-вторых, верхняя окрашенная граница струи искусственно поднимается (по потоку) из-за сноса боковых областей струи. Обе эти причины завышают траекторию струи, определенную по фотографиям, по сравнению с истинной. Лучшее совпадение траекторий у поперечных струй объясняется тем, что снос с боков окрашенной области узкой струи (ши-

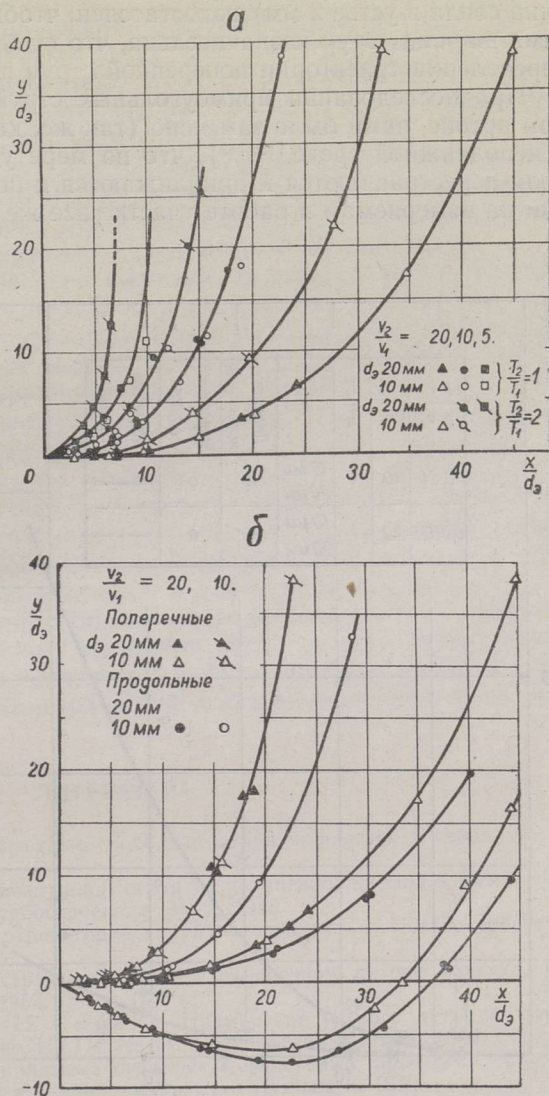


Рис. 5. Траектории прямоугольных струй, развивающихся в поперечном потоке: а — поперечные струи при $\alpha = 90^\circ$; б — поперечные и продольные струи при $\alpha = 90^\circ$ и 120° .

ротной струи, определенной по фотографиям, по сравнению с истинной. Лучшее совпадение траекторий у поперечных струй объясняется тем, что снос с боков окрашенной области узкой струи (ши-

рина сопла в устье 2 мм) недостаточен, чтобы закрасить поток, кроме того сама ширина струи незначительна, что существенно уменьшает ошибку в определении траектории поперечной струи по фотографиям.

При исследовании прямоугольных струй, развивающихся в поперечном потоке, нами было замечено (так же, как и в струях, развивающихся в неподвижной среде^[12, 14]), что по мере удаления от устья скоростные поля перестраиваются и приближаются к полям круглой формы, которой они на измеряемом в работе участке все же не достигают.

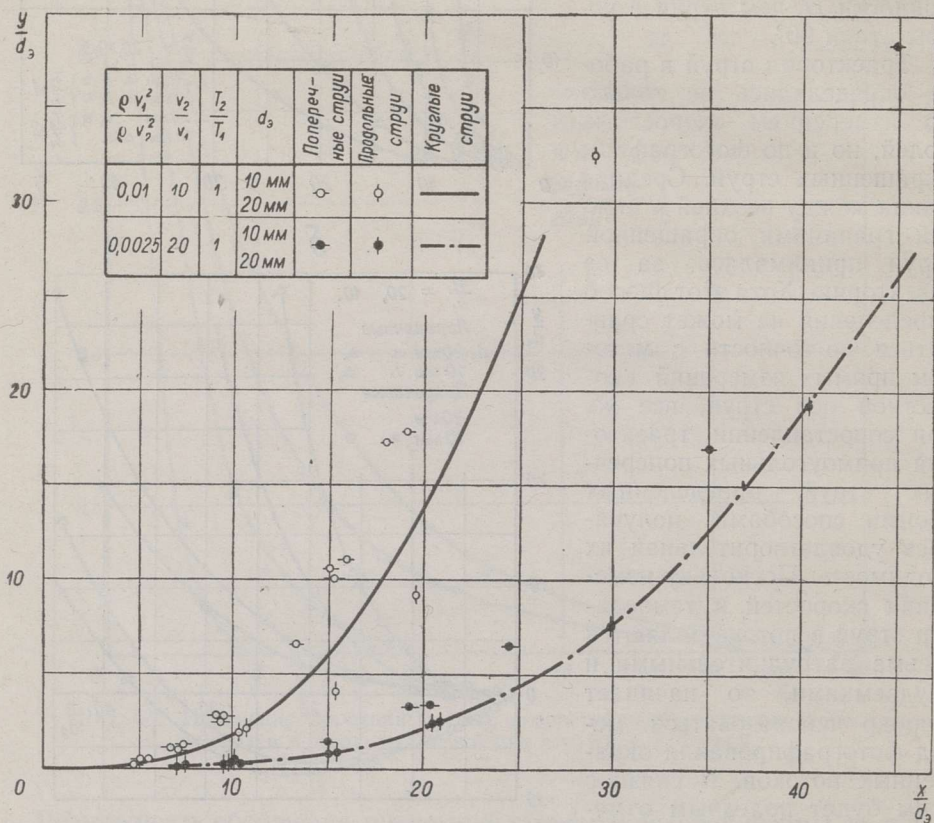


Рис. 6. Сравнение траекторий струй разных форм устья.

Различие в траекториях поперечной и продольной струй объясняется, во-первых, тем, что продольная струя по выходе из устья на сравнительно большом участке испытывает меньшее изгибающее усилие со стороны основного потока, чем более широкая поперечная струя. Во-вторых, более интенсивное падение осевой скорости поперечной струи приводит к меньшим (по сравнению со струей продольной или круглой) местным значениям гидродинамического параметра $\rho_2 v_2^2 / \rho_1 v_1^2$.

На рис. 6 приведено сравнение траекторий струй поперечной, продольной и круглой форм устья. Траектории круглой струи заимствованы из прежней работы автора^[3] и даны без экспериментальных точек в виде пунктирной и сплошной кривых. На графике нанесены траектории струй, определенные при двух значениях гидродинамического параметра. Из ри-

сунка видно, что траектории продольной и круглой струй между собой совпадают. Струя поперечной формы устья, как известно, является менее дальнобойной. Поэтому закономерно, что экспериментальные точки на рис. 6, характеризующие ее траекторию, расположены выше траектории, общей для круглых и прямоугольных струй.

Поскольку струи острого дутья в топках выполняют в основном роль аэродинамической мешалки, то можно полагать, что при прочих равных условиях совпадение траекторий струй должно приводить к одинаковым результатам в части перемешивания надслойных топочных газов.

Это положение было проверено опытами на модели топки. Не вдаваясь в подробное рассмотрение этих опытов, отметим только, что одно-стороннее острое дутье, образованное прямоугольными продольными и круглыми струями одинаковых эквивалентных диаметров, действительно приводило к одинаковому перемешиванию надслойных топочных газов.

Проведенные опыты снимают разногласия в вопросе о роли и значении острого дутья, организованного прямоугольными струями, имеющими отношение сторон в устье h_0/b_0 от 1 до 5. Если траектории прямоугольных продольных струй даже при $h_0/b_0 = 5$ совпали с круглыми, то по аналогии с обобщениями струй различных начальных форм в неподвижной среде можно считать, что обобщаемы и струи всех рассмотренных выше правильных форм устья, развивающиеся в поперечном потоке.

Следовательно, нет никакой разницы в аэродинамике топки, какую бы форму (из рассмотренных выше) ни имели струи острого дутья. Расчет дутья должен производиться по известным формулам для круглых струй с использованием, вместо диаметра струй в устье, эквивалентного диаметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Абрамович, Турбулентные свободные струи жидкостей и газов, М.—Л., Госэнергоиздат, 1948.
2. И. О. Замазы, Истечение воздушной струи из кольцевого канала в затопленное пространство, «Котлотурбостроение», № 2, 1948.
3. Ю. В. Иванов, Уравнения траекторий струй острого дутья, «Котлотурбостроение», № 8, 1952.
4. Ю. В. Иванов, Плоская струя во внешнем поперечном потоке воздуха, Изв. АН ЭССР, т. 2, № 2, 1953.
5. Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин, Применение острого дутья в топках, Информационное письмо ЦКТИ № 14, Свердловск—Москва, 1944.
6. Д. Н. Ляховский, Аэродинамика струевых и факельных процессов, Сборник ЦКТИ «Теплопередача и аэродинамика», кн. 12, вып. 3, 1949.
7. П. М. Масловский, О настильности факела в мартеновских печах, Сборник научно-исследовательских работ Кузнецкого металлургического комбината, вып. I, 1947.
8. В. И. Миткалинский, Деформация газовых потоков при соударении и ударе о плоскость, Сборник трудов Московского института стали XXVIII — «Технологические физико-химические и механические свойства стали», М., 1949.
9. В. Слесарев, Журнал русского металлургического общества, т. I, 1913, стр. 709.
10. С. Б. Старк, Исследование процессов перемешивания в осесимметричном факеле, Сборник трудов Московского института стали XXXI — «Технология производства и обработки стали», М., 1953.
11. С. Б. Старк, Перемешивание газовых потоков в факеле, «Техническая физика», т. XXII, вып. 10, 1953.
12. С. Б. Старк, Влияние формы выходного сечения горелки на аэродинамику факела, Сборник Московского института стали, 1954.
13. С. В. Татищев, Топочное устройство промышленных котельных, ч. I, Госэнергоиздат, 1956.
14. В. А. Туркус, Структура воздушного приточного факела, выходящего из прямоугольного отверстия, «Отопление и вентиляция», № 5, 1935.

ERINEVA SUUDMEKUJUGA DÜÜSIDEST VOOLAVATE ÕHUJUGADE AERODÜNAAMIKA

J. Ivanov,
tehniliste teaduste kandidaat

Resümee

Praktikas kasutatakse düüse, millede suudmekuju on väga mitmesugune: ümmargune, rõngakujuline (toru torus), elliptiline, kolmnurkne, ruudu- või ristkülikukujuline.

Selle kohta, kuidas düüsi suudme kuju mõjub joa aerodünaamikale, on kirjanduses esitatud väga erinevaid arvamusi. Põhjalikumalt on aga uuritud ainult ümmarguse ja lapiku joa levimist liikumatus keskkonnas.

Käesolevas töös käsitletakse juba varem mitmete uurijate poolt avaldatud katseandmeid erineva suudmekujuga düüsidest liikumatus keskkonda voolavate jugade aerodünaamika kohta ja ühtlasi valgustatakse autori enda poolt ühtlases vabas põikvooluses levivate jugadega teostatud katsete tulemusi. Katseandmete ümbertöötamisel on arvestatud düüsi suudme ava ekvivalentset läbimõõtu ja ühtlasi põhjendatud sellise võtte õiguspärasust.

Koldegaaside segunemisprotsessi uurimiseks neljakandiliste piki- ja ümmarguste jugadega tehtud katsete tulemused näitavad, et ekvivalentse läbimõõdu korral on jugade poolt esilekutsutud segunemiseefekt ühesugune.

Erineva suudmekujuga düüsidest antavate teravate jugade (välja arvatud neljakandilise põikjoa) arvutamisel võib järelikult kasutada ümmarguste jugade jaoks tuletatud võrrandeid, võttes arvesse düüsi suudme ava ekvivalentset läbimõõtu.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
24. X 1956

AERODYNAMICS OF AIR BLASTS FLOWING FROM NOZZLES WITH DIFFERENTLY SHAPED OUTLETS

J. Ivanov

Summary

In practice nozzle outlets are of round, circular (pipe within pipe), elliptical, triangular, square and rectangular shape.

In corresponding literature very different opinions have been expressed about the way in which the shape of the nozzle outlet influences the aerodynamics of the blast. But only the spreading of round and flat blasts in an immovable medium has been thoroughly studied.

The present article deals with experimental data previously published by many authors concerning the aerodynamics of blasts flowing into an immobile medium from nozzles with differently shaped nozzle outlets and at the same time elucidates the results of tests carried out by the author regarding the spreading of blasts in a uniform, free, transverse flow. In elaborating the test data an equivalent diameter of the nozzle outlet has been computed, and the correctness of the used method has been proved.

In presenting the results of tests carried out with rectangular blasts the author shows that in using nozzles of this shape it is possible to generalise the test data concerning the abating of velocity in blast axis by means of the introduction of an equivalent diameter. A comparison of tests with rectangular and round blasts proved that the axis velocity of their longitudinal blasts abates in a similar way and their trajectories converge. A rectangular blast, however, abates more rapidly; its extension is by 20% smaller than that of a longitudinal rectangular or round blast.

On the basis of an analysis of graphical material the author states the possibility of deducing a common equation for blasts flowing from nozzles with different shapes of nozzle outlet with the exception of blasts flowing from a rectangular nozzle placed with its longer side in a transverse position to the fundamental flow (rectangular transverse blast).

The results of tests carried out with longitudinal rectangular or round blasts for the study of the mixing process of flue gases show that in case of equivalent diameters the mixing effect called forth by the blasts is identical.

In computing overfire air jets from nozzles with differently shaped nozzle outlets (with the exception of the rectangular transverse blast) it is consequently admissible to use equations deduced for round blasts, taking into consideration an equivalent diameter of the nozzle outlet opening.

Academy of Sciences of the Estonian SSR,
Institute of Energetics

Received
Jan. 24, 1956