

Ю. ИВАНОВ, В. ЗЛОБИН

## ОДНОРЯДНАЯ СИСТЕМА КРУГЛЫХ СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

В статье излагаются результаты экспериментального исследования развития и массообмена однорядной периферийной системы струй, вытекающих из круглых отверстий в тонкой стенке в плоско-параллельный поток в круглой трубе.

**Описание экспериментальной установки и методики измерений.** Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу напорного типа диаметром рабочей части 250 мм (рис. 1). Основной поток создается низконапорным вентилятором типа МЦ-4, смонтированным во входной части установки. Для создания более равномерного скоростного поля за вентилятором установлены конус, направляющие решетки и сделано небольшое сужение сечения. Средняя скорость основного потока выдерживалась во всех основных опытах постоянной — около 7,8 м/сек.

Воздух, имитирующий струи газа, нагнетается в газовую магистраль центробежным вентилятором (7) и подогревается электронагревателем (5) до избыточной температуры  $35 \div 40^\circ \text{C}$ . Из газовой магистрали подогретый воздух поступает в распределительный коллектор (4), откуда в виде периферийных струй вытекает нормально к основному потоку воздуха через отверстия, просверленные в тонкой стенке обечайки. Распределительный коллектор имеет большие размеры и такую форму, что стенки его и величины скорости не оказывают заметного влияния на формирование струй; этим обеспечивается равномерное распределение воздуха по отверстиям. Это имеет существенное значение, так как в системе изучалось развитие лишь одной из струй.

Коэффициент истечения сохранялся постоянным и в этих опытах был  $\sim 0,65$ .

Для определения температурной (концентрационной) оси струи и соответственно затухания избыточной температуры вдоль оси измерялись профили температуры в различных сечениях струи, нормальных к ее оси. Температура измерялась хромель-копелевой термопарой, с диаметром головки 0,6 мм, а отсчет показаний производился на усилителе постоянного тока (10) с регулируемой шкалой усиления и двухкоординатным потенциометром (11). Кроме того, в каждом опыте измерялись расход воздуха в струевой магистрали (диафрагмой) (6), скорость основного потока и скорость струи в устье, параметры воздуха лаборатории. Перепады давления измерялись стандартными микроанометрами типа ММН.

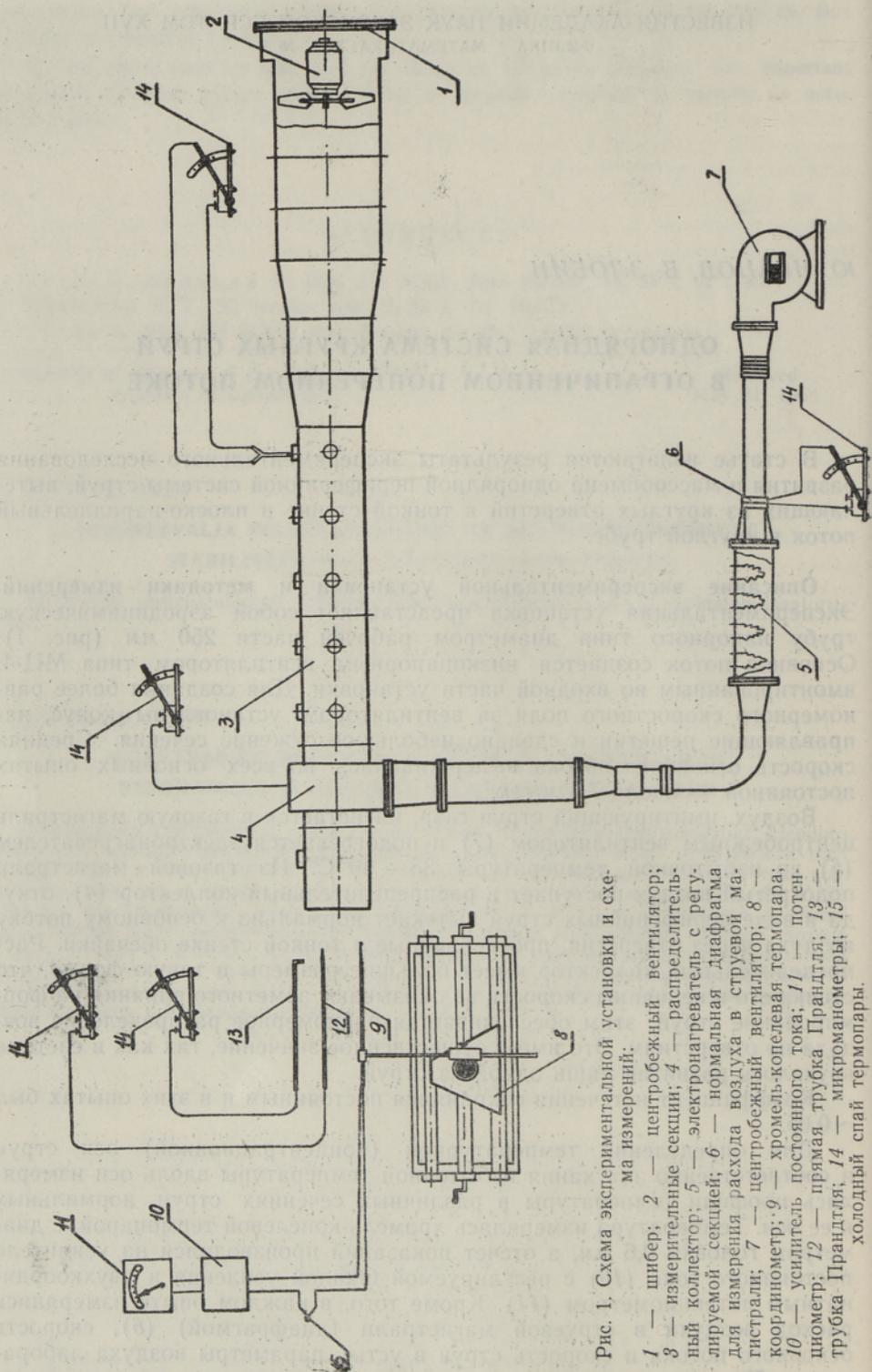


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и схема измерений:

- 1 — шибер; 2 — центробежный вентилятор; 3 — измерительные секции; 4 — распределительный коллектор; 5 — электроннагреватель с регулируемой секцией; 6 — нормальная диафрагма для измерения расхода воздуха в струевой магистральной; 7 — центробежный вентилятор; 8 — координатометр; 9 — хромель-копелевая термопара; 10 — усилитель постоянного тока; 11 — потенциометр; 12 — прямая трубка Прандтля; 13 — трубка Прандтля; 14 — микроамперметр; 15 — холодный спай термопары.

## Обозначения

- $x, y$  — координаты текущей точки на оси струи;  
 $h$  — глубина проникновения системы струй в поперечный поток;  
 $d$  — начальный диаметр сопла или отверстия;  
 $d_0$  — начальный эффективный диаметр струи, вытекающей из отверстия в тонкой стенке;  
 $s$  — шаг между струями;  
 $D$  — диаметр рабочей части трубы;  
 $l$  — длина вдоль траектории струи;  
 $\rho_1, V_1$  — плотность и среднерасходная скорость основного потока соответственно;  
 $\rho_2, V_2$  — плотность и среднерасходная скорость струи в устье соответственно;  
 $V_{20}$  — начальная скорость истечения в струе газа, вытекающей из отверстия в тонкой стенке;  
 $q_c, q_{\mu c}$  — гидродинамический параметр по смеси; первый вычисляется по среднерасходной скорости струи в устье сопла, второй — по начальной скорости истечения;  
 $T_1, T_2, T_{2m}$  — температура в абсолютной шкале набегающего потока, текущая температура на оси струи и температура в устье струи соответственно;  
 $n$  — число струй, размещенных равномерно по периферии канала.  
 Чертой сверху обозначены безразмерные величины:

$$\bar{x}_0 = x/d_0; \quad \bar{y}_0 = y/d_0; \quad \bar{l}_0 = l/d_0; \quad \bar{h}_0 = h/d_0;$$

$$\bar{s}_0 = s/d_0; \quad \bar{D}_0 = D/d_0; \quad \Delta \bar{T}_2 = \frac{T_2 - T_1}{T_{2m} - T_1}.$$

**Постановка опытов.** В работе [1] показано, что для системы струй, расположенных в ряд и развивающихся в неограниченном сносимом потоке, ось струй определяется гидродинамическим параметром  $q = \rho_2 V_2^2 / \rho_1 V_1^2$ , относительным шагом между струями  $\bar{s} = s/d$  и начальным углом атаки струй  $\alpha_{20}$ .

В. Безменовым [2] предложено для учета ограниченности потока, вычислять гидродинамический параметр не по величинам набегающего потока  $\rho_1, V_1$ , а по параметрам потока после смешения  $q_c, V_c$ . Тогда гидродинамический параметр по смеси  $q_c = \rho_2 V_2^2 / q_c V_c^2$ . Если плотность набегающего потока мало отличается от плотности потока после смешения, т. е.  $q_c / \rho_1 \approx 1$ , то имеется простая связь:

$$q_c = \frac{\rho_2 V_2^2}{q_c V_c^2} = \frac{\rho_2 V_2^2}{\rho_1 V_1^2 \eta^2}, \quad (1)$$

где  $\eta$  — соотношение весовых расходов суммарного и набегающего потока, которое можно вычислить по формуле

$$\eta = \frac{\rho_1 Q_1 + \rho_2 Q_2}{\rho_1 Q_1}, \quad (2)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — объемный расход в единицу времени основного потока и струй соответственно.

Для струй, развивающихся в плоско-параллельном потоке в круглом канале, необходимо ввести еще один параметр — относительный диаметр трубы  $\bar{D} = D/d$ .

Кроме того, для струй, вытекающих из отверстия в тонкой стенке, вводится еще один параметр — коэффициент истечения  $\mu$ . В работе [3] выявлена зависимость коэффициента истечения от различных конструктивных и режимных параметров. Там же предложена методика учета его влияния, заключающаяся в замене начального диаметра струи

эффективным начальным диаметром струи  $d_s = \sqrt{\mu} d$  и в замене в гидродинамическом параметре среднерасходной скорости скоростью истечения  $V_{2\mu}$ .

В итоге для развития системы струй, вытекающих из отверстий в тонкой стенке в плоско-параллельный поток в круглом канале, предлагается следующая система режимных и конструктивных параметров:

- 1) гидродинамический параметр по смеси  $q_{\mu c}$ ;
- 2) относительный шаг между струями  $\bar{s}$ ;
- 3) относительный диаметр канала  $\bar{D}_s$ ;
- 4) начальный угол атаки  $\alpha_{20}$ .

Определить влияние каждого из перечисленных параметров в отдельности в одной работе не представляется возможным. В наших опытах варьировались первые три параметра. Начальный угол атаки  $\alpha_{20}$  составлял  $90^\circ$  и коэффициент истечения  $\mu \approx 0,65$ .

Таблица 1

Параметры обечаек, использованных в опыте

$n$	$d, \text{мм}$	$\bar{s}$	$\bar{D}$
6	20	6,55	12,5
8	15	6,55	16,7
6	15	8,70	16,7
9	10	8,70	25,0
12	7,5	8,7	34,4
9	7,5	11,6	34,4
6	10	13,1	25,0
6	7,5	17,4	34,4

В табл. 1 приведен набор обечаек, использованных в опытах. В каждой серии опытов с одной обечайкой измерения производились не менее чем при трех значениях гидродинамического параметра по смеси в интервале  $q_{\mu c} = 4 \div 25$ . Толщина обечаек составляла 1 мм и отношение начального диаметра струи к толщине обечайки изменялось от 0,05 до 0,134, т. е. во всех опытах

стенки всегда можно считать тонкими [3].

Ось струи измерялась на протяжении двадцати калибров от устья струи. Необходимо отметить, что максимум температуры на оси при расстояниях от устья струи  $\bar{x}_s = 10$  калибров становится недостаточно различимым, а определение его — субъективным.

Основной задачей исследования было определение формы оси однородной системы струй, вытекающих из отверстий в тонкой стенке

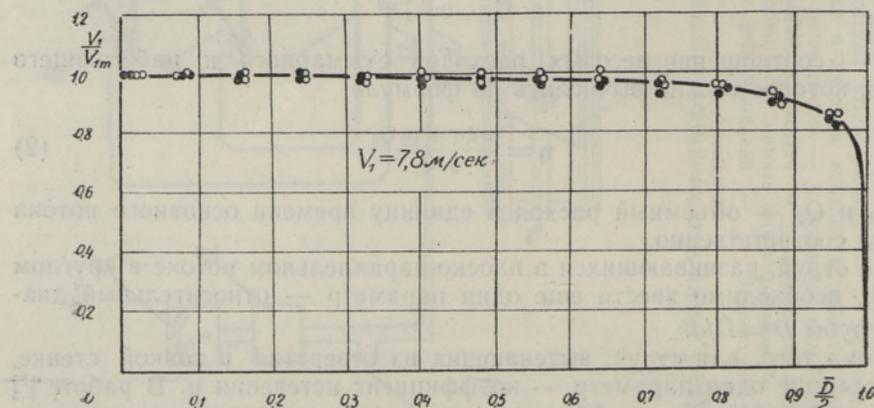


Рис. 2. Профиль скорости основного потока в сечении перед системой струй.

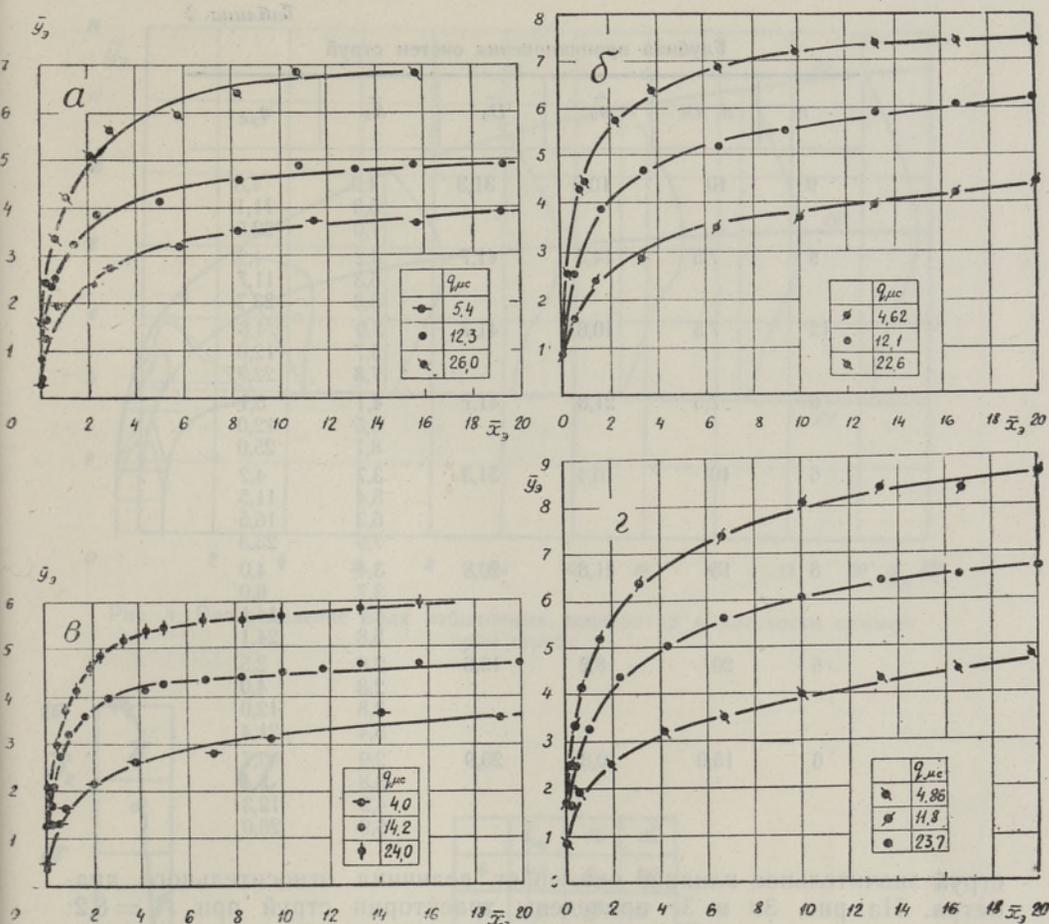


Рис. 3. Форма оси однорядной системы струй, вытекающих из отверстия в тонкой стенке в поперечный поток в канале:

*a* —  $\bar{s}_3 = 10,8$ ;  $\bar{D}_3 = 20,9$ ; *б* —  $\bar{s}_3 = 10,8$ ;  $\bar{D}_3 = 43,0$ ;

*в* —  $\bar{s}_3 = 8,2$ ;  $\bar{D}_3 = 20,9$ ; *з* —  $\bar{s}_3 = 14,5$ ;  $\bar{D}_3 = 43,0$ .

в плоско-параллельный поперечный поток в трубе круглой формы. На рис. 2 изображен профиль скорости основного потока в круглой трубе, в сечении перед системой струй. Измерения производились по четырем взаимно перпендикулярным радиусам сечения. На рис. 2 значения величин текущей скорости основного потока отнесены к ее величине в центре сечения трубы. Поскольку профиль скорости основного потока неравномерен, то возникает вопрос о характерной скорости основного потока. За характерную скорость основного потока при вычислении гидродинамического параметра принималась среднерасходная скорость набегающего потока.

Графическая интерпретация части экспериментальных данных по определению формы оси струй приведена на рис. 3. Траектории системы струй с равными относительными шагами  $\bar{s}_3 = 10,8$ , но с разными относительными диаметрами  $\bar{D}_3 = 20,9$ ; 43,0 при трех значениях гидродинамического параметра по смеси изображены на рис. 3а и 3б. Сопоставление этих графиков показывает, что на глубину проникновения системы

Таблица 2

Глубина проникновения систем струй					
$n$	$d, \text{мм}$	$\bar{s}_s$	$\bar{D}_s$	$\bar{h}_s$	$q_{\text{рс}}$
9	10	10,8	31,3	4,0	4,8
				5,3	11,1
				7,0	22,5
9	7,5	14,5	41,7	4,2	4,9
				6,3	11,7
				8,3	23,7
12	7,5	10,8	41,7	3,9	4,6
				5,7	12,0
				7,3	22,7
6	7,5	21,8	41,7	4,1	5,1
				6,5	12,0
				8,7	25,0
6	10	16,4	31,3	3,7	4,2
				5,4	11,5
				6,3	16,5
				7,9	23,3
8	15	21,8	20,8	3,4	4,0
				3,7	6,0
				4,7	14,1
				5,8	24,1
6	20	8,2	15,6	2,0	2,5
				2,8	4,0
				3,8	12,0
				5,4	21,4
6	15,0	10,8	20,9	2,9	3,7
				3,8	5,4
				4,9	12,3
				6,9	26,0

струй значительное влияние оказывает величина относительного диаметра. На рис. 3в и 3г приведены траектории струй при  $\bar{s}_s = 8,2$ ;  $\bar{D}_s = 20,9$  и  $\bar{s}_s = 14,5$ ;  $\bar{D}_s = 43,0$ . Сопоставление кривых (рис. 3а—г) показывает, что глубина проникновения струй существенно зависит от величины относительного шага  $\bar{s}_s$ . Нетрудно видеть, что гидродинамический параметр по смеси является определяющим режимным параметром для формы осей струй, развивающихся в ограниченном поперечном потоке. Но и он не является достаточным, так как дальнобойность системы струй зависит еще от конструктивных параметров  $\bar{s}_s$  и  $\bar{D}_s$ . Характерным для всех струй, развивающихся в ограниченном пространстве (в отличие от свободного потока), является то, что траектории струй уже вблизи устья приобретают направление потока. Чем больше глубина проникновения струй, тем более резко выполаживаются траектории, что дополнительно связано с взаимодействием встречных струй.

Для всех исследованных систем приведены данные о глубине проникновения струи в поток —  $h_s$  (табл. 2). Физической причиной уменьшения глубины проникновения струй является, по-видимому, ограничение потока системой встречных струй. Чтобы проверить это предположение, был проведен такой опыт. В рабочую часть трубы устанавливалась вставка в виде секторов, разделяющих систему струй на отдельные струи по плоскостям симметрии потока. Оказалось, что траектория системы струй без перегородки и с перегородкой не изменялась.

На рис. 4 показано распределение поля безразмерных избыточных температур в плоскости, проходящей через центр отверстия струи. Зна-

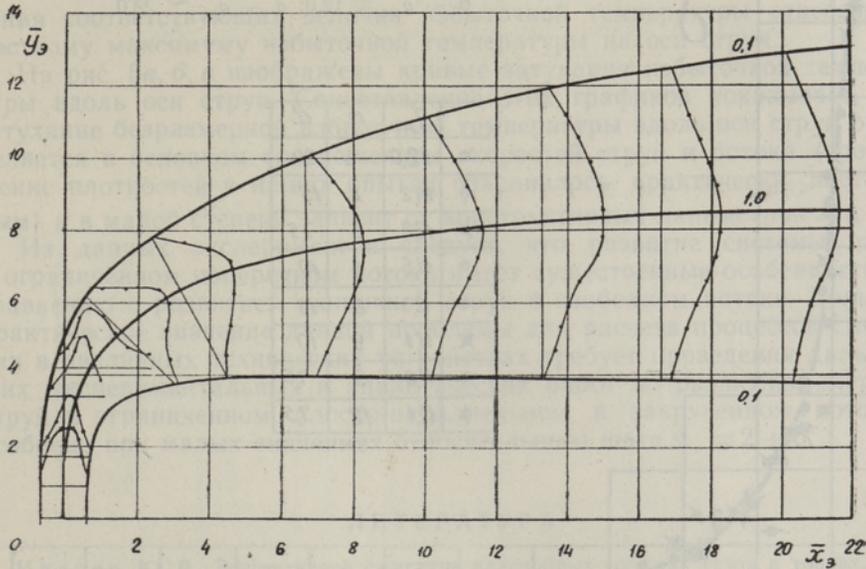


Рис. 4. Распределение поля избыточных температур в плоскости симметрии струй.

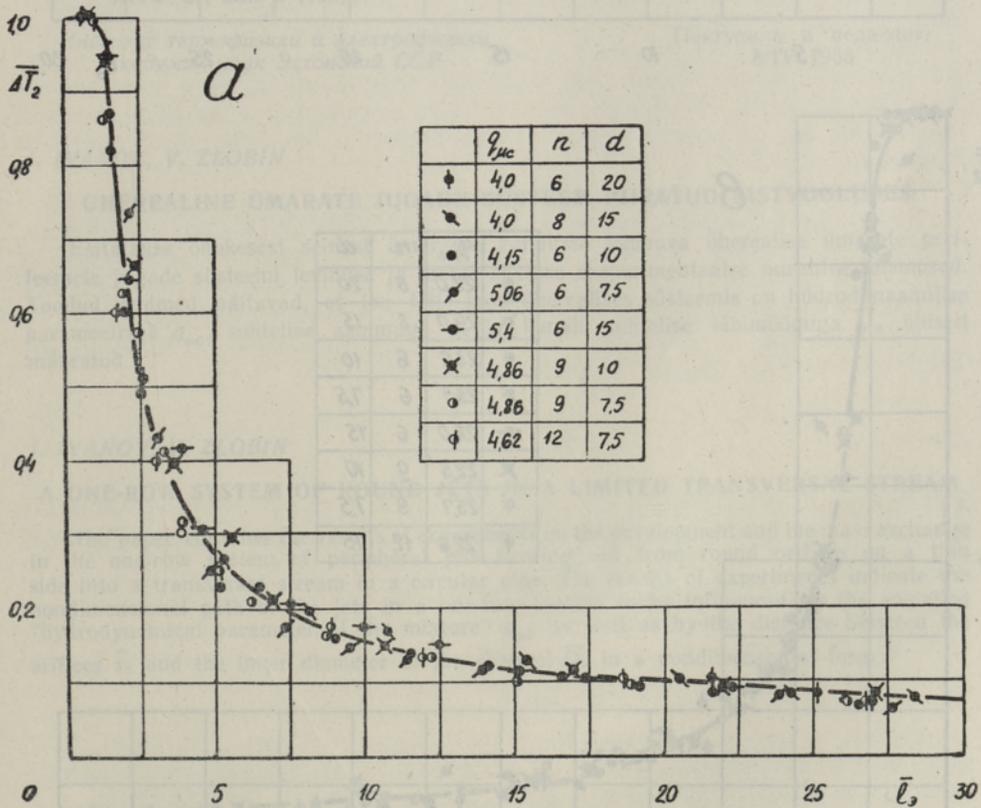
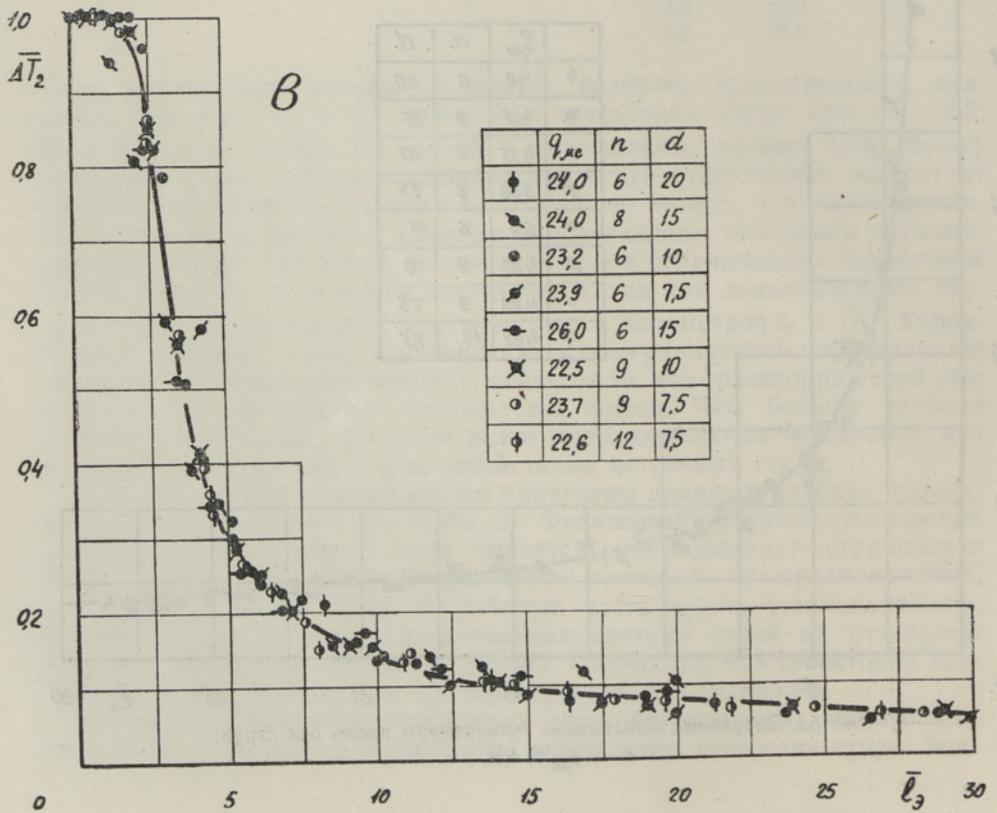
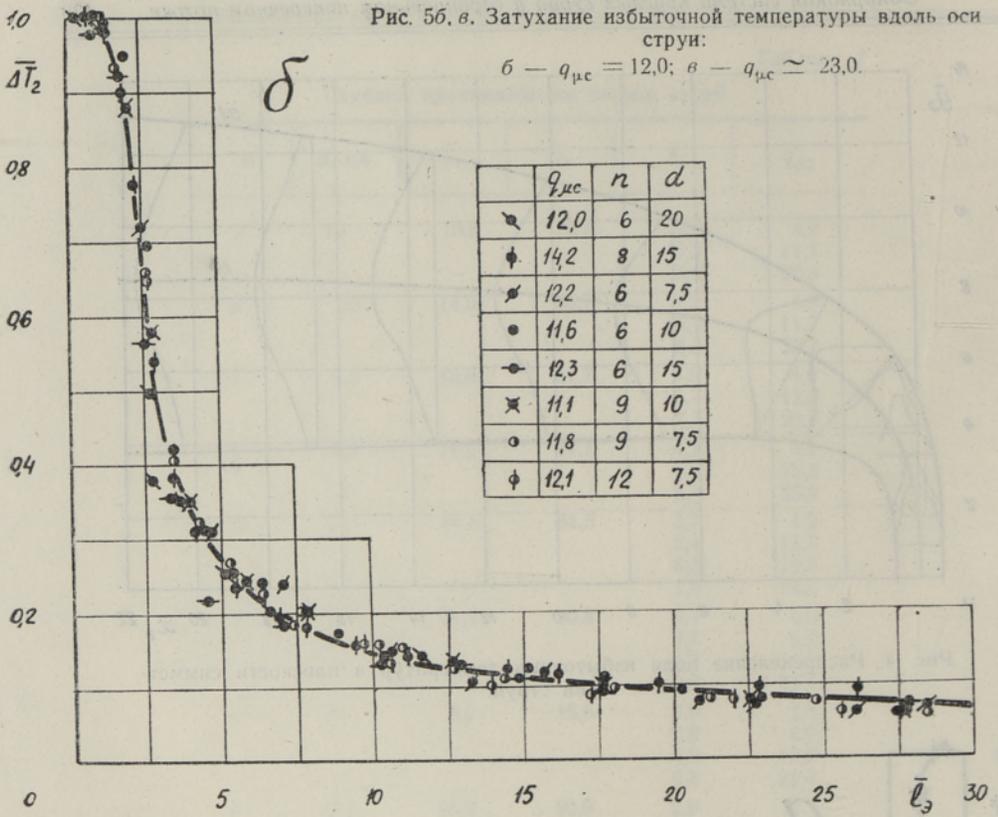


Рис. 5а. Затухание избыточной температуры вдоль оси струи:

$a - q_{\mu c} \approx 4,5.$

Рис. 56. в. Затухание избыточной температуры вдоль оси струи:

б —  $q_{\mu c} = 12,0$ ; в —  $q_{\mu c} \approx 23,0$ .



чения соответствующих величин избыточной температуры отнесены к местному максимуму избыточной температуры на оси струи.

На рис. 5а, б, в изображены кривые затухания избыточной температуры вдоль оси струи. Сопоставление этих графиков показывает, что затухание безразмерной избыточной температуры вдоль оси струи определяется в основном соотношением скоростей струи и потока (соотношение плотностей в наших опытах сохранялось практически постоянным) и в малой степени зависит от конструктивных параметров  $\bar{s}_0$  и  $\bar{D}_0$ .

Из данных экспериментов следует, что развитие системы струй в ограниченном поперечном потоке имеет существенные особенности по сравнению с развитием единичной струи в свободном потоке. Большое практическое значение данной проблемы для расчета процессов смешения в различных технических устройствах требует проведения дальнейших экспериментальных и аналитических работ по развитию системы струй в ограниченном плоско-параллельном и закрученном потоках, особенно при малых значениях относительного шага  $\bar{s}_0 = 2 \div 6$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Ю. В., Эффективное сжигание надслойных горючих газов в топках, Таллин, Эстгосиздат, 1959.
2. Абрамович Г. Н., Теория турбулентных струй, М., Физматгиз, 1960.
3. Шандоров Г. С., Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду, ЖТФ, 27, вып. 1 (1957).

*Институт термодинамики и электрофизики  
Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
8/IV 1968

J. IVANOV, V. ZLOBIN

#### OHEREALINE ÜMARATE JUGADE SÜSTEEM PIIRATUD RISTVOOLUSES

Esitatakse õhukesest seinast ümarasse kanalisse suubuva üherealise ümarate perifeersetete jugade süsteemi levimise ja massivahetuse eksperimentaalse uurimise tulemused. Toodud andmed näitavad, et joa telje kuju üherealises süsteemis on hüdrodünaamilise parameetriga  $q_{\mu c}$ , suhtelise sammuga  $\bar{s}_0$  ja kanali suhtelise läbimõõduga  $\bar{D}_0$  ühiselt määratud.

J. IVANOV, V. ZLOBIN

#### A ONE-ROW SYSTEM OF ROUND JETS IN A LIMITED TRANSVERSAL STREAM

The paper contains the results of experiments on the development and the mass exchange in the one-row system of peripheral jets flowing out from round orifices on a thin side into a transversal stream in a circular pipe. The results of experiments indicate the nondimensional path of the jets in a one-row system to be influenced by the so-called "hydrodynamical parameter of the mixture"  $q_{\mu c}$  as well as by the distance between the orifices  $\bar{s}_0$  and the inner diameter of the channel  $\bar{D}_0$  in a nondimensional form.