

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СТРУИ В СПУТНОМ ПОТОКЕ

Ю. В. ИВАНОВ,

кандидат технических наук

Х. Н. СУИ

Теоретические и экспериментальные исследования распространения турбулентных струй способствовали существенному прогрессу топочной и печной техники, промышленной вентиляции, реактивных двигателей и т. п. Ниже излагаются закономерности изменения осевых скоростей изотермических и неизотермических круглых и плоских струй, развивающихся в спутном потоке. Эти закономерности установлены на экспериментальной установке. Эксперименты выполнены научным сотрудником Х. Н. Суйем в секторе теплотехники Института энергетики Академии наук Эстонской ССР под руководством кандидата технических наук Ю. В. Иванова.

### Опытная установка и методика измерений

Общий вид опытной установки показан схематически на рис. 1. Основная часть установки представляет собой горизонтальную аэродинамическую трубу (5) диаметром 700 мм и длиной 2200 мм. Для создания воздушного потока в трубу вмонтирован аксиальный вентилятор МЦ-7 (7). Для того чтобы исключить вращение основного потока, в участок трубы после осевого вентилятора вставлены обечайки, между которыми набраны ячейки, а в выходное сечение трубы вставлялись различные конфузоры, которые дополнительно выравнивали скоростное поле основного потока на выходе и повышали абсолютные значения скорости. Наибольшее количество опытов было проведено с конфузором, имеющим на выходе диаметр, равный 450 мм, с прямым участком после пережима длиной в 500 мм. Для лучшего выравнивания скоростного поля основного потока в конфузор устанавливались выравнивающие решетки с различными площадями живого сечения и размерами проходных отверстий из проволочек  $\varnothing = 0,5$  мм.

Регулирование скорости осуществлялось при помощи регулятора (6) секторного типа, смонтированного на фланце всасывающей части корпуса вентилятора.

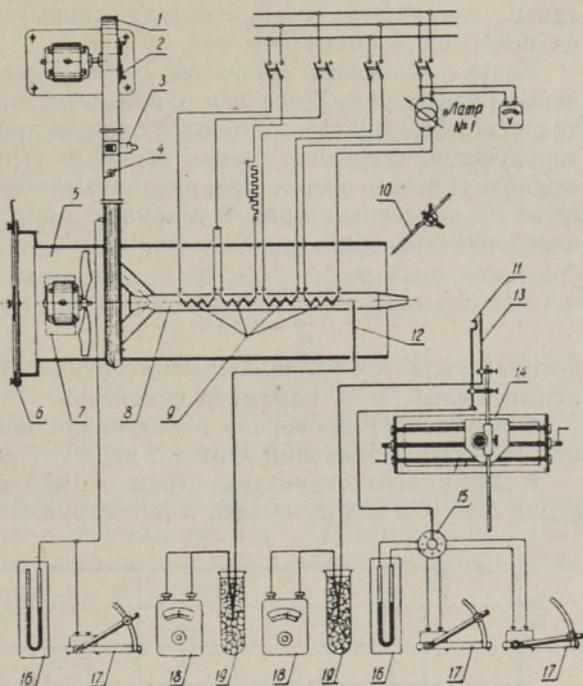
В центральной части установки вдоль ее оси вставлена труба (8) с внутренним диаметром 68 мм, соединенная с вентилятором среднего давления (1) для создания струи, имеющей направление, параллельное движению основного потока. Скорость струи регулировалась шиберами на входном (2) и выходном (3) патрубках вентилятора. В трубу вмонтирован нагреватель (9) из нихромовой проволоки. Снаружи труба изолировалась листовым и шнуровым асбестом.

Подвод воздуха в трубу из вентилятора осуществлялся через четыре полусплюсненные трубы. Сделано это с целью уменьшения завихрений, образованных при обтекании подводящих труб, и исключения их влияния на скоростное поле основного потока. В опытах были использованы съемные круглые сопла диаметром  $d = 10,2$  и  $20,2$  мм и плоские сопла шириной  $2b_0 = 1,2$  и  $2,6$  мм и длиной устья  $L_c = 110$  и  $100$  мм; испытанные сопла имели, соответственно, отношения  $L_c/b_0 = 183$  и  $77$ .

Измерение динамического напора на оси струи и в ее поперечных сечениях производилось скоростной микротрубкой (11), показания которой отсчитывались на микроманометре типа ММН с дополнительными уклонами порядка  $1/16$  и  $1/32$ .

Рис. 1. Схема опытной установки и измерений:

1 — вентилятор среднего давления; 2 — шибер на входном патрубке вентилятора; 3, 4 — шиберы на выходном патрубке вентилятора; 5 — аэродинамическая труба; 6 — регулятор основного потока; 7 — вентилятор МЦ-7; 8 — центральная труба, создающая струю; 9 — электронагреватели струи; 10 — термометр; 11 — микротрубка; 12 — контрольная термомпара; 13 — термомпара для измерения температуры поля струи; 14 — координатник; 15 — переключатель давлений; 16 — U-образный манометр; 17 — микроманометры; 18 — потенциометр типа ПП; 19 — сосуд Дюара.



Измерительные приборы (микротрубка и термомпара) перемещались в потоке с помощью координатника (14) в любую точку измеряемого поля в интервале изменений координат\* ( $x$  от 0 до 650 мм,  $y$  и  $z$  от 0 до  $\pm 500$  мм).

Опыты начались с выравнивания полей скоростей потока. Для получения отношений скоростей порядка  $\lambda = v_2/v_1 = 20$  пришлось понизить среднюю скорость основного потока ( $v_1$ ) до  $\sim 4$  м/сек, так как вентилятор среднего давления не позволял увеличить скорость струи ( $v_2$ ) выше 90 м/сек. Для повышения точности измерений опыты с меньшими отношениями скоростей потока ( $\lambda$  от 1,5 до 9) проводились при  $v_1 \approx 10$  м/сек. Некоторые изменения средних значений скоростей от опыта к опыту связаны с засорением выравнивающих решеток и последующей их чисткой.

Предварительные опыты показали, что поле скоростей достаточно симметрично, и поэтому измерения в каждом сечении проводились только по горизонтали. Давления и температуры в опытах со струей  $d = 10,2$  мм измерялись по оси струи в десяти сечениях, а со струей  $d = 20,2$  мм в семи сечениях. При исследовании плоских струй измерения производились в пятнадцати сечениях.

### Результаты опытов с круглой струей

Обработка опытных данных проведена в относительных координатах  $v_m/v_0$ ,  $ax/d$ , где  $v_m$  — максимальная осевая скорость в данном сечении,  $a$  — коэффициент структуры струи (зависящий от турбулентности),  $v_0$  — максимальная скорость в центре устья струи ( $v_0 = v_2$ ).

Многие авторы, занимающиеся исследованием развития струи в потоке, используют вместо отношения скоростей ( $v_m/v_0$ ) отношение разности скоростей  $v_m - v_1/v_0 = v_1$ . Следует отметить, что искать закономерность изменения последнего отношения при экспериментальном исследовании труднее, так как кривые, характеризующие распределение осевых скоростей, располагаются очень близко друг от друга. В координа-

\* Координата  $x$  соответствует направлению струи,  $y$  и  $z$  представляют собой перпендикулярные ему направления.

тах  $v_m/v_0$ ,  $ax/d$  расстояния между кривыми увеличиваются и точность их построения повышается.

Затухание осевых скоростей струи, вытекающей в спутный поток из сопел разных диаметров при одинаковом значении  $\lambda$ , образует в относительных координатах  $v_m/v_0$ ,  $ax/d$  единую кривую. Опытные точки, характеризующие затухание осевой скорости струи, развивающейся в равномерном спутном потоке при различных отношениях скоростей ( $\lambda$  от 1,5 до  $\infty$  \*), нанесены на рис. 2, и кривые, проведенные через эти точки, удовлетворительно описываются формулой

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{0,435}{\frac{ax}{d} - 0,15 + \frac{2,2}{\lambda^2 - 1}} + \frac{0,8}{\lambda - 0,2}, \quad (1)$$

которая является уравнением семейства гипербол с перпендикулярными асимптотами,  $\lambda$  — параметр семейства.

Формула (1) проверена в интервале значений  $ax/d$  от 1 до 4,4 ( $x/d$  от 14 до 65) и значений  $\lambda$  от 1,5 до  $\infty$ .

Коэффициент структуры струи  $a$  имел в опытах два значения: для струй  $d = 10,2$  мм  $a = 0,069$ , и для струй  $d = 20,2$  мм  $a = 0,071$ .

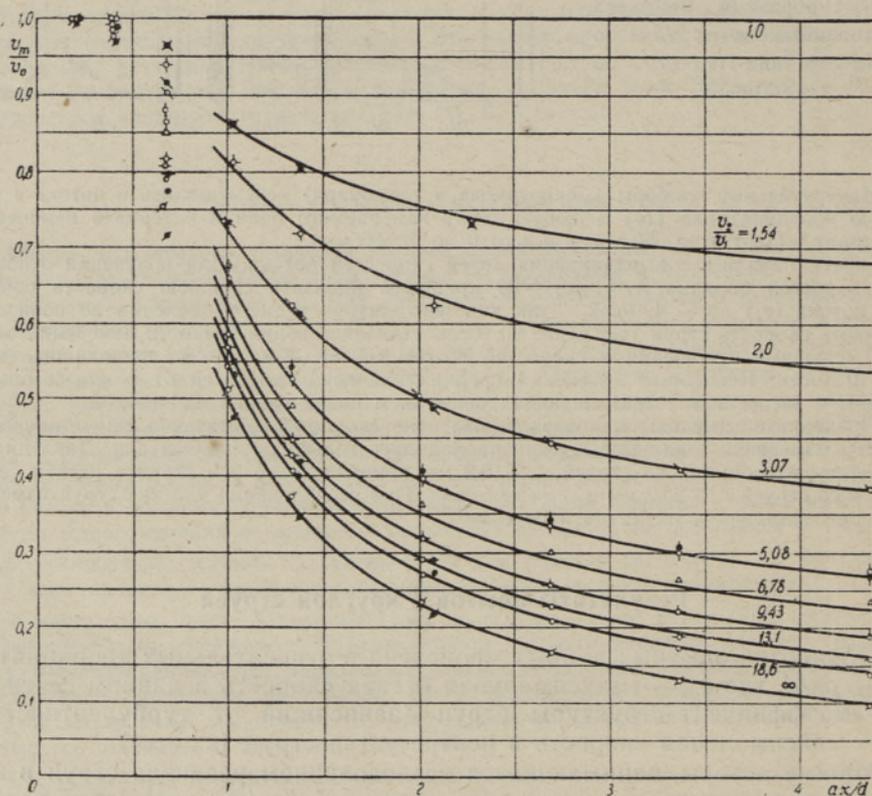


Рис. 2. Осевая скорость круглой изотермической струи, развивающейся в спутном потоке.

Как показывает график, опытные точки струй различных диаметров удовлетворительно ложатся на соответствующие гиперболы.

\* Случай  $\lambda = \infty$  соответствует скоростям  $v_1 = 0$ ,  $v_2 \neq 0$ .

Максимальное отношение скоростей, при котором проводились опыты (кроме  $\lambda = \infty$ ), составляло 18,6. Уже при этом отношении скоростей расстояние между кривыми ( $\lambda = 18,6$  и  $\lambda = \infty$ ) является настолько незначительным, что по существу отпадает необходимость в проведении опытов со струей в этом интервале.

При малых отношениях скоростей ( $\lambda < 1,5$ ) проведение опытов было затруднено измерениями скоростей в условиях, когда разность скоростей струи и потока была почти соизмерима с неравномерностью поля скоростей основного потока. Поэтому минимальное отношение скоростей, которое удалось получить в опытах на данной установке, было равно 1,54.

Для практического использования полученных закономерностей затухания осевой скорости изотермической круглой струи, развивающейся в спутном потоке, на рис. 3 построена номограмма по формуле (1) для значений  $\lambda$  от 1 до  $\infty$ .

После опытов с изотермическими струями производились опыты также и с неизотермическими, вытекающими из тех же сопел в спутный поток при  $T_2/T_1 = 2$  с разными отношениями скоростей  $v_2/v_1$  — от 3,02 до  $\infty$ . С этой целью струя подогревалась электронагревателями до температуры  $\sim 325^\circ\text{C}$ .

Экспериментальные данные, характеризующие затухание осевой скорости неизотермической струи в спутном потоке, представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на кривые, построенные по формуле

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{0,35}{\left(\frac{ax}{d}\right)^{1,1}} + \frac{0,884}{\lambda}. \quad (2)$$

Формула (2) проверена в интервале значений  $ax/d$  от 0,7 до 4,4 ( $x/d$  от 10 до 65) и может быть использована для определения осевых скоростей в пределах значений  $\lambda$  от 3 до  $\infty$  при  $T_2/T_1 = 2$ . Проведение опытов с  $\lambda < 3$  на данной экспериментальной установке не представлялось возможным.

Полученные экспериментальные данные по изотермической и неизотермической ( $T_2/T_1 = 2$ ) круглой струе приведены в табл. 1.

### Результаты опытов с плоской струей

В такой же последовательности на той же установке были проведены опыты с плоской струей, развивающейся в спутном потоке. В отличие от опытов с круглыми струями, при построении на рис. 5 опытных данных, вместо координаты  $ax/d$ , была использована координата  $ax/b_0$ .

Изменение осевой скорости изотермической плоской струи, развивающейся в спутном потоке, удовлетворительно описывается формулой

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{1,95 - \frac{0,14}{\lambda^{0,5} - 1,28}}{\left(\frac{ax}{b_0} + 3\right)^{0,7}} + \frac{0,7}{\lambda - 0,29} + 0,05. \quad (3)$$

Формула (3) проверена в интервале значений  $ax/b_0$  от 6 до 60 ( $x/b_0 \sim$  от 60 до 600) и может быть использована в пределах отношений скоростей  $\lambda$  от 2 до  $\infty$ .

Для практического использования полученных закономерностей затухания осевой скорости изотермической плоской струи, развивающейся в спутном потоке, на рис. 6 построена номограмма по формуле (3) для значений  $\lambda$  от 2 до  $\infty$ .

Характер изменения осевой скорости плоской неизотермической струи в спутном потоке при  $T_2/T_1 = 2$  можно видеть на рис. 7 и в табл. 2.

### Сравнение с результатами других авторов

При сравнении приведенных здесь экспериментальных данных по круглым и плоским струям с шестью решениями различных авторов наилучшее совпадение получилось с аналитическими решениями Г. Н. Абрамовича<sup>[1]</sup> и Л. А. Вулиса и Т. П. Леонтьевой<sup>[2]</sup>. В последней работе изменения осевых скоростей определяются методом наложения движения потоков.

Как показали проведенные сравнения расчетных данных, полученных по этому методу, с опытными данными по круглым струям, начиная со значений  $ax/d = 2,5$  и до конца исследованного участка (от  $x/d \sim 35$  до 63) для значений  $\lambda$  от 2 до  $\infty$  имеется удовлетворительное совпадение расчета с опытом.

Сравнение графиков, полученных в результате расчета по теоретическим решениям, предложенным Г. Н. Абрамовичем<sup>[1]</sup>, с нашими экспериментальными данными сделано по круглым струям на рис. 8. Изменение осевых скоростей круглых струй по расчету нанесено на рисунке линиями. Расчетные данные при поле скоростей в устье струи, принятом равномерным ( $n_{1u} = n_{2u} = 1$ , где  $n$  — коэффициенты, характеризующие неравномерность поля скоростей в устье сопла), показаны пунктирными линиями, а при учете имеющей место в наших опытах неравномерности поля скоростей ( $n_{1u} \neq n_{2u} \neq 1$  соответственно приняты  $n_{1u} = 0,94$ ,  $n_{2u} = 0,9$ ) — сплошными линиями.

Из рисунка видно, что отношения скоростей ( $v_{ax}/v_0$ ), определенные по теоретическому решению, больше экспериментальных значений, если  $\lambda < 5,08$ . Учет неравномерности поля скоростей улучшает совпадение с экспериментом при  $\lambda \leq 18,6$ , но ухудшает при  $\lambda = \infty$ . Изменение осевой скорости по теоретическому решению в большом интервале значений  $1,5 \leq ax/d \leq 4,4$  и  $5,08 \leq \lambda \leq \infty$  удовлетворительно совпадает с экспериментальным.

Сравнение экспериментальных данных по плоским струям с аналитическим решением по методу наложения движения потоков, предложенному Л. А. Вулисом и Т. П. Леонтьевой<sup>[2]</sup>, показало удовлетворительное совпадение на участке  $7 \leq ax/b_0 \leq 57$ , если  $\lambda > 5,22$ . При значениях  $\lambda \leq 5,22$  значения отношений скоростей ( $v_m/v_0$ ), полученные аналитическим методом, больше экспериментальных.

Сравнение экспериментальных данных по плоским струям с аналитическим решением Г. Н. Абрамовича дало во всем исследованном интервале значений еще лучшее совпадение, чем для круглых струй.

Некоторое расхождение можно отметить для значения  $\lambda = 5,22$  и в некоторой степени для  $\lambda = 10,1$ . При этих отношениях скоростей величины, определенные по аналитическому решению, несколько превышают экспериментальные.

Проведенные сравнения показывают, что предложенные аналитические методы расчета<sup>[1, 2]</sup> дают удовлетворительные результаты, хотя и не для всего исследованного нами интервала изменений параметра  $\lambda$ .

В заключение можно считать, что предложенные нами номограммы для широкого интервала изменений параметра  $\lambda$ , построенные на основании эмпирических формул, вполне могут быть использованы при практических расчетах.

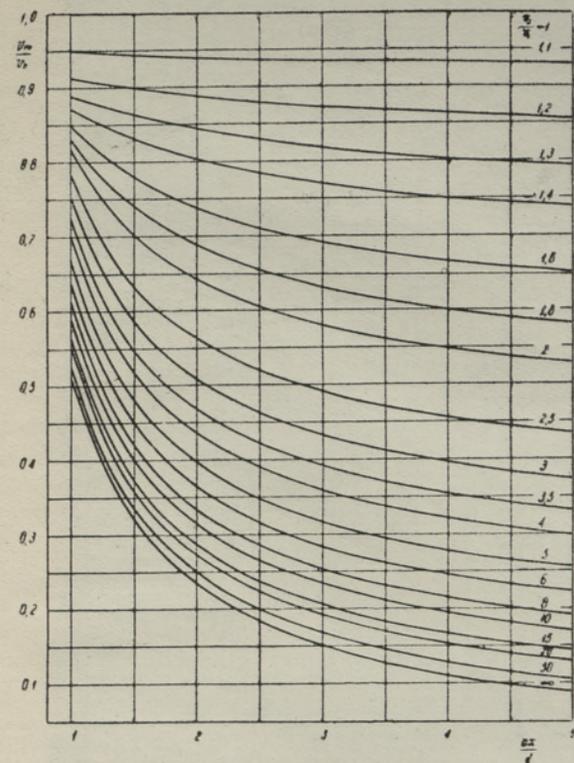


Рис. 3. Номограмма затухания осевой скорости круглой изотермической струи, развивающейся в спутном потоке.

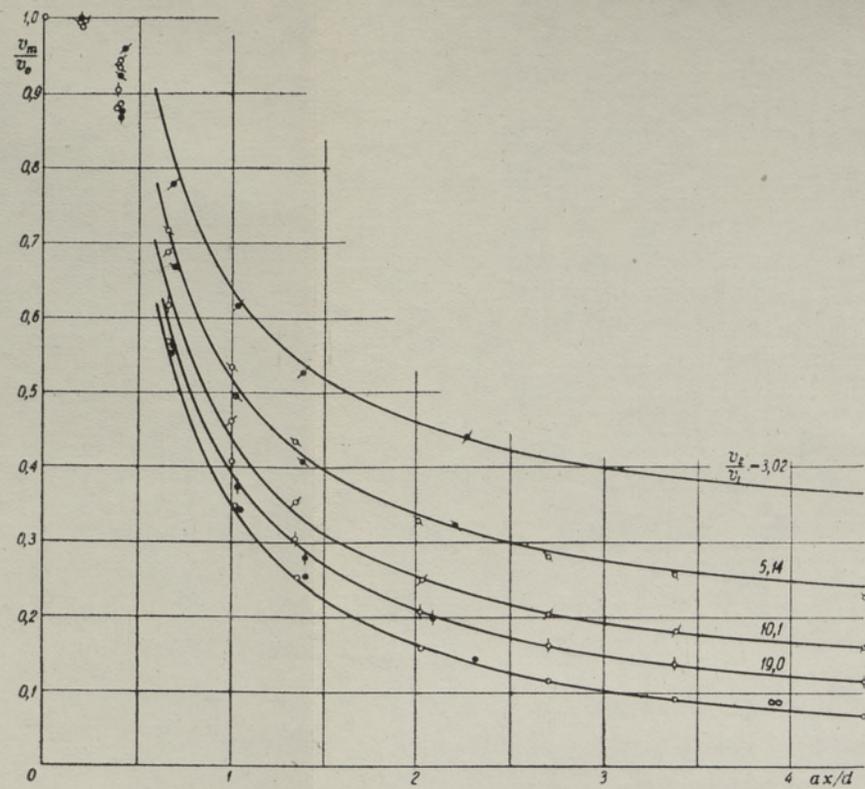


Рис. 4. Осевая скорость круглой неизомермической струи ( $T_2/T_1 = 2$ ), развивающейся в спутном потоке.

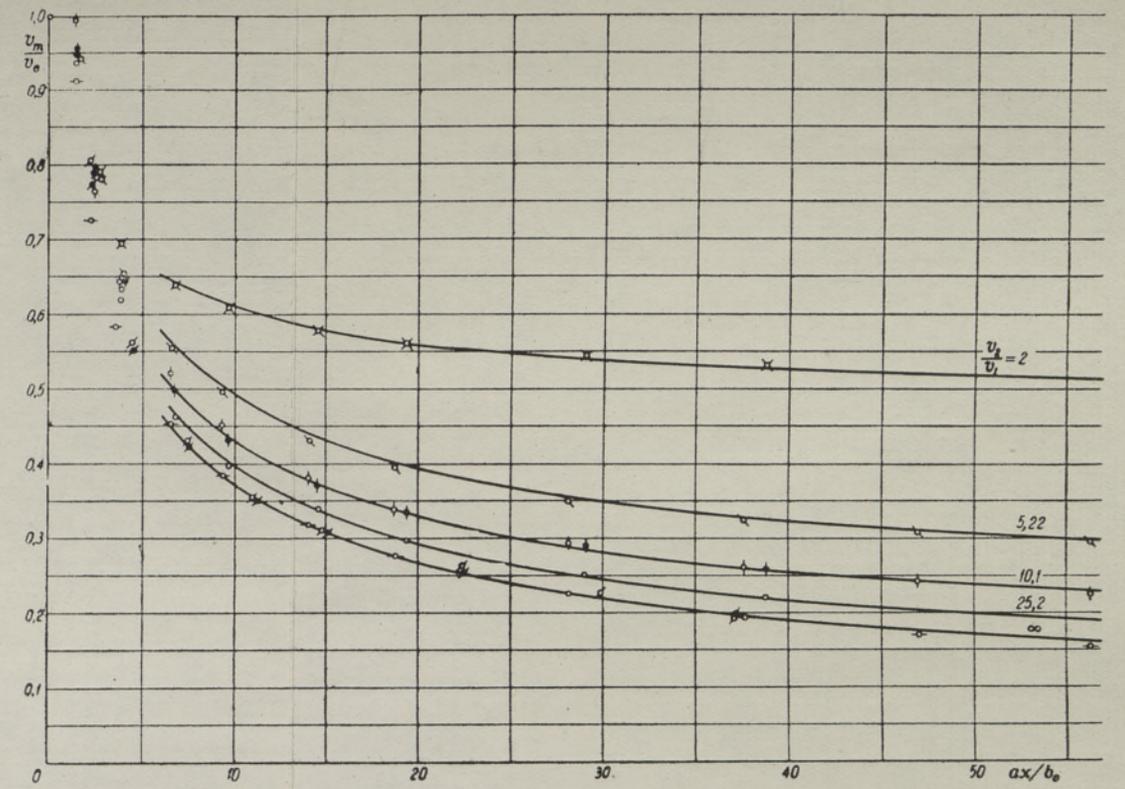


Рис. 5. Осевая скорость плоской изотермической струи, развивающейся в спутном потоке.

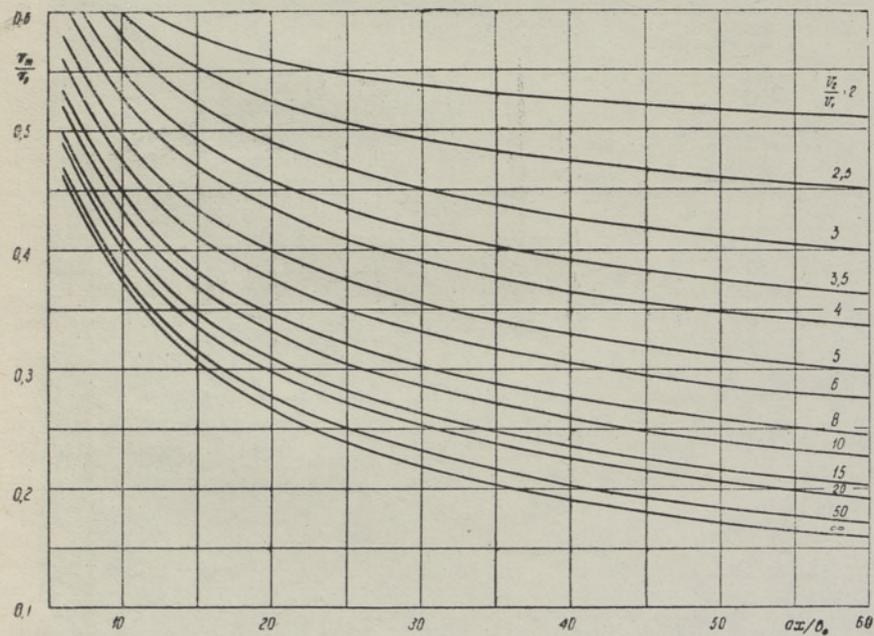


Рис. 6. Номограмма затухания осевой скорости плоской изотермической струи, развивающейся в спутном потоке.

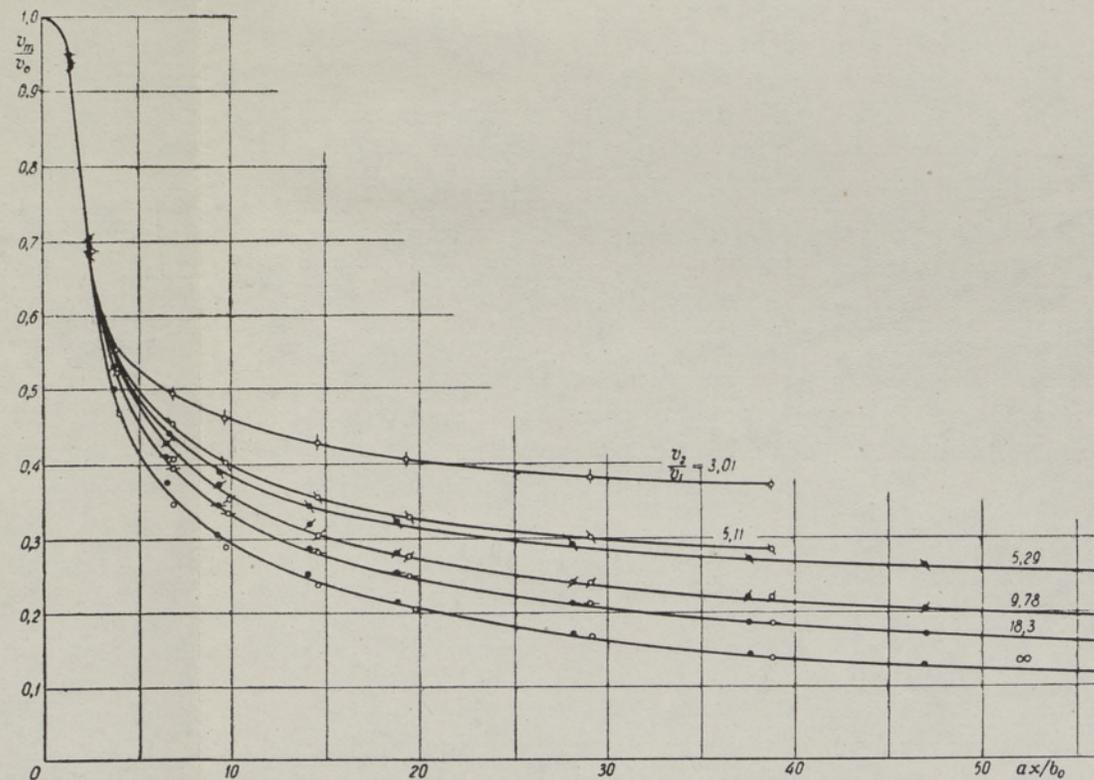


Рис. 7. Осевая скорость плоской неизомермической струи ( $T_2/T_1 = 2$ ), развивающейся в спутном потоке.

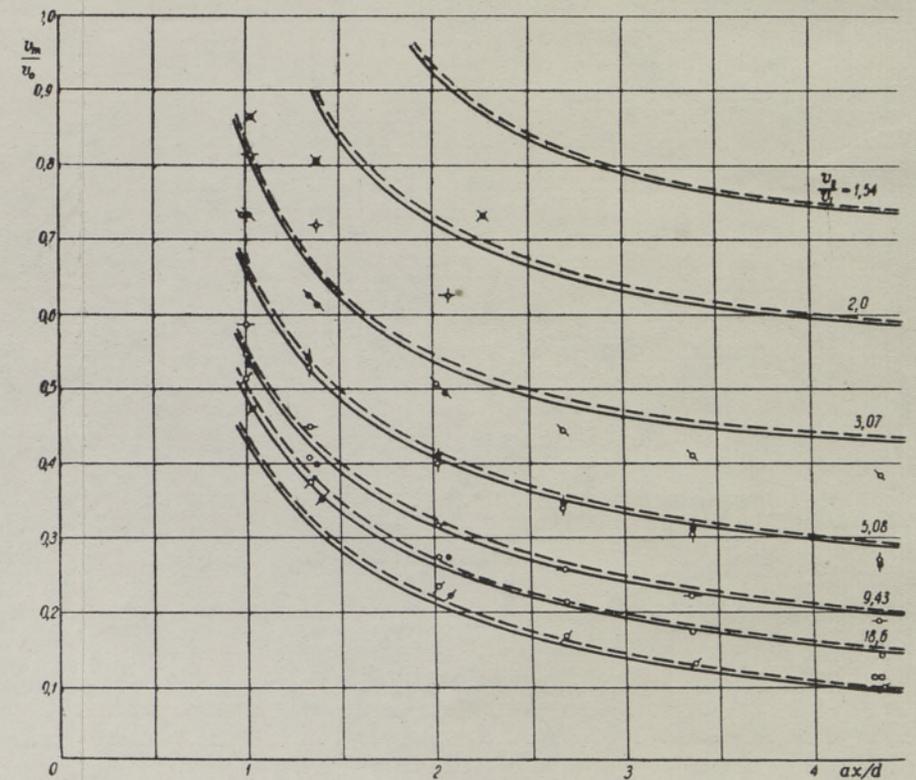


Рис. 8. Сравнение опытных данных по изменению осевой скорости круглой изотермической струи, развивающейся в спутном потоке, с расчетом по формулам Г. Н. Абрамовича [1].



## Круглые струи в спутном потоке

№ опыта	$v_2/v_1$	$v_2$ , м/сек	$v_1$ , м/сек	$\rho_2 v_2^2 / \rho_1 v_1^2$	$x$ (мм)							$v_m/v_0$
					60	100	150	200	300	400	500	
Изотермические струи												
21а	$\infty$	50,1	0	$\infty$	0,980	0,760	0,511	0,371	0,231	0,165	0,129	0,095
1	18,6	80,0	4,3	345,8	0,985	0,788	0,542	0,405	0,270	0,208	0,170	0,139
2	13,1	56,4	4,3	171,6	0,985	0,807	0,567	0,425	0,288	0,225	0,186	0,156
29	9,43	95,3	10,1	88,8	0,990	0,815	0,582	0,447	0,315	0,255	0,220	0,190
25	6,78	76,7	11,3	46,0	0,988	0,850	0,623	0,494	0,364	0,301	0,267	0,235
27	5,08	58,0	11,4	25,8	0,997	0,863	0,655	0,529	0,400	0,340	0,305	0,276
12к	5,08	52,4	10,3	25,8	0,995	0,879	0,672	0,543	0,406	0,342	0,304	0,270
17к	3,08	31,8	10,3	9,5	1,00	0,901	0,731	0,623	0,505	0,443	0,409	0,377
Неизотермические струи ( $T_2/T_1 = 2$ )												
35	$\infty$	139,5	0	$\infty$	0,884	0,567	0,351	0,251	0,156	0,113	0,088	0,067
9	19,0	80,0	4,2	181,6	0,904	0,620	0,410	0,304	0,205	0,159	0,135	0,111
33	10,1	115,0	11,4	50,5	0,944	0,687	0,464	0,351	0,248	0,205	0,180	0,159
22	5,14	54,5	10,6	13,2	0,935	0,715	0,533	0,435	0,328	0,279	0,252	0,225
Изотермические струи												
21б	$\infty$	50,0	0	$\infty$	0,992	0,969	0,715	0,474	0,344	0,221	0,173	0,144
5	18,6	80,1	4,3	346	0,999	0,986	0,772	0,530	0,400	0,272	0,221	0,194
6	13,1	56,4	4,3	171,6	0,996	0,986	0,794	0,548	0,417	0,288	0,248	0,225
20к	3,06	31,2	10,2	9,4	1,00	0,999	0,918	0,735	0,612	0,488	0,439	0,418
19к	2,0	21,2	10,6	4,0	0,998	0,996	0,939	0,812	0,717	0,621	0,552	0,525
31	1,54	17,4	11,3	2,4	1,00	0,995	0,964	0,862	0,804	0,730	0,665	0,638
Неизотермические струи ( $T_2/T_1 = 2$ )												
34	$\infty$	116,2	0	$\infty$	0,992	0,886	0,552	0,349	0,256	0,194	0,144	0,118
11	19,0	80,0	4,2	179,9	1,00	0,875	0,562	0,372	0,282	0,221	0,194	0,173
36	5,1	58,2	11,4	13,0	1,00	0,920	0,665	0,495	0,409	0,342	0,304	0,276
32	3,02	34,3	11,4	4,49	0,990	0,957	0,778	0,615	0,525	0,465	0,439	0,418

 $d = 10,2$  мм;  $a = 0,069$  $d = 20,2$  мм;  $a = 0,071$

## Плоские струи в сплутном потоке

№ опыта	$\frac{v_2}{v_1}$	$v_2$ , м/сек	$v_1$ , м/сек	$\frac{\rho_2 v_2^2}{\rho_1 v_1^2}$	$x$ (мм)										
					42	60	90	120	180	240	300	360	420	480	540
					$v_m/v_0$										
Изотермические струи															
44	$\infty$	80	0	$\infty$	0,453	0,383	0,318	0,275	0,223	0,190	0,168	0,150			
45	10,1	74	7,3	102	0,524	0,452	0,379	0,340	0,293	0,261	0,239	0,222	0,208	0,199	0,190
46	5,22	60	11,5	27,3	0,554	0,493	0,428	0,390	0,346	0,322	0,305	0,292	0,282	0,273	0,265
Неизотермические струи ( $T_2/T_1 = 2$ )															
50	$\infty$	132,3	0	$\infty$	0,374	0,303	0,248	0,212	0,169	0,144	0,127	0,113			
49	18,3	131,4	7,2	166,8	0,408	0,346	0,284	0,250	0,211	0,184	0,167	0,155	0,124		
51	9,78	111,5	11,4	47,7	0,431	0,375	0,318	0,280	0,240	0,217	0,201	0,191			
52	5,29	58,25	11,0	14,0	0,433	0,385	0,342	0,318	0,287	0,270	0,258	0,251			
					$v_m/v_0$										
Изотермические струи															
14а	$\infty$	80,0	0	$\infty$	0,464	0,391	0,337	0,297	0,256	0,222	0,430	0,350	0,310	0,261	0,196
14б	$\infty$	40,0	0	$\infty$	0,498	0,427	0,195	0,334	0,290	0,260	0,425	0,350	0,304	0,256	0,190
15	25,2	96,0	3,8	635	0,636	0,605	0,576	0,562	0,544	0,532					
48	10,1	73,8	7,3	102											
43	2,0	23,4	11,7	4,0											
Неизотермические струи ( $T_2/T_1 = 2$ )															
37	$\infty$	116,2	0	$\infty$	0,344	0,287	0,234	0,205	0,164	0,136					
41	18,0	133,3	7,4	161,8	0,392	0,331	0,278	0,248	0,208	0,182					
38	9,78	114,3	11,7	47,8	0,407	0,349	0,300	0,274	0,238	0,218					
39	5,11	57,0	11,7	11,84	0,449	0,400	0,354	0,326	0,298	0,280					
40	3,01	34,9	11,6	4,47	0,493	0,458	0,426	0,404	0,379	0,367					

 $2b_0 = 1,2 \text{ мм}; a = 0,094$  $2b_0 = 2,6 \text{ мм}; a = 0,097$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Абрамович, Турбулентная струя в движущейся среде, Изв. АН СССР, ОТН, № 6, 1957.
2. Л. А. Вулис и Т. П. Леонтьева, О спутных и встречных турбулентных струях. Изв. АН Казахской ССР, Серия энергетическая, № 9, 1955.

Институт энергетике  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
21 I 1958

## JOA LEVIMISKIIRUS SAMASUUNALISES VOOLUSES

J. Ivanov,  
tehniliste teaduste kandidaat

H. Sui

## Resüme

Käesolevas artiklis käsitletakse ümara ja lameda õhujoa levimist samasuunalises vooluses ning antakse nende jugade telgkiiruse sõltuvus düüsi suudme kaugusest parametri  $\lambda = v_2/v_1$  erinevate väärtuste juures (kus  $v_2$  on jao maksimaalne kiirus düüsi suudmes,  $v_1$  — vooluse keskmine kiirus).

Artiklis esitatud joonistest nähtub, et erinevate läbimõõtudega joad moodustavad kiirussuhte  $\lambda$  antud väärtuse juures ühtivad kõverad. Artiklis esitatud valeimid on koos kõlas katseandmetega uuritud parameetrite  $\lambda$  ja  $ax/d$  väärtuste piirkonnas ( $\lambda = 1,54 \div \infty$ ,  $ax/d = 1 \div 4,4$ ). Nende valemite põhjal koostatud nomogramm (joon. 3 ja 6) võimaldavad hõlpsasti leida samasuunalises vooluses leviva jao telgkiiruse.

Katseandmete võrdlus Nõukogude Liidus ja välismaal teostatud samalaadsete teoreetiliste ja eksperimentaalsete uurimustega kinnitavad kirjanduse loetelus märgitud tööde seisukohti.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse  
21. I 1958

## STUDY OF THE DEVELOPMENT OF A JET IN A CO-STREAM

J. Ivanov, H. Sui

## Summary

The present article, consecrated to an experimental study of the development of a round and a flat jet in a co-stream, quotes axial velocities of jets at different parameter values  $\lambda = v_2/v_1$  (where  $v_2$  stands for the velocity of the jet at the orifice and  $v_1$  — for the velocity of the co-stream). The given drawings show that the experimental data on jets of different diameters generalize into one single curve at the given value of  $\lambda$ .

The recommended computation formulae correspond with experimental data within the whole investigated range of values  $ax/d$ , at  $\lambda$  values in the limits from 1.50 up to  $\infty$ . In accordance with these formulae axial velocity nomograms of round and flat jets for whole values of parameter  $\lambda$  have been built up on drawings 3 and 6.

A comparison of the experimental data with contemporary analytical studies, carried out in the U.S.S.R., as well as abroad, gives preference to the quoted works [1, 2].

Academy of Sciences of the Estonian S.S.R.,  
Institute of Energetics

Received  
Jan. 21, 1958