

<https://doi.org/10.3176/phys.math.tech.1965.4.13>

Ю. ИВАНОВ, А. ЭПШТЕЙН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ КРУГЛОЙ СТРУИ В СВОБОДНОМ ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Проблема развития круглой турбулентной струи, вытекающей под любым углом атаки в равномерный сносящий поток, уже давно привлекает внимание исследователей. Интерес к изучению этой задачи имеет не только теоретико-познавательное значение, но вызван и многочисленными ее приложениями.

Особенности развития струи определяются помимо воздействия сносящего потока, в основном, двумя факторами — начальным импульсом струи и гравитационной силой за счет различной плотности струи и окружающей среды. В настоящее время нет недостатка в различных попытках теоретического решения вопроса о форме оси струи в поперечном потоке. Однако почти все экспериментальные исследования, посвященные данной проблеме [1–3] до сих пор ограничивались условиями, при которых влияние гравитационной силы на развитие струи отсутствовало или практически было ничтожным. Как показано в работе [1], траектория струи в таком случае зависит от величины комплекса

$\frac{\rho_V V^2}{\rho_W W^2}$, названного гидродинамическим параметром (здесь V и ρ_V —

соответственно выходная скорость и плотность струи; W и ρ_W — скорость и плотность поперечного потока). Более общий случай, когда на струю заметно воздействует гравитационная сила, — в частности, при истечении перегретой струи перпендикулярно поперечному потоку (рис. 1), — представляет значительный интерес, в связи с общей проблемой рассеивания в атмосфере дымовых газов, выходящих из труб электростанций и промышленных предприятий. Однако экспериментально этот случай почти не

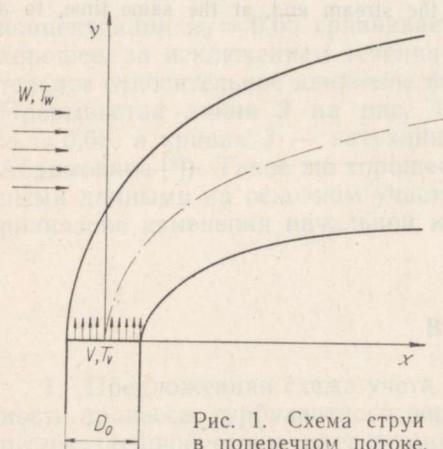


Рис. 1. Схема струи в поперечном потоке.

исследован. Единственная известная нам работа [4], посвященная этому вопросу, к сожалению, не позволяет сделать четких количественных выводов о степени влияния подъемной силы на изгибание перегретой круглой струи в поперечном потоке. Поэтому представляется необходимым проведение соответствующих экспериментов совместно с аналитическим исследованием данного вопроса.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты экспериментального исследования круглой перегретой струи, вытекающей в горизонтальный свободный поперечный поток под прямым углом к нему, при условиях, когда влиянием подъемной силы на развитие струи нельзя пренебречь.

Постановка эксперимента. Проведенный теоретический анализ показал, что влияние подъемной силы должно зависеть от величины комплекса $\frac{gD_0V\Delta T_0}{W^3q_w}$ или $\frac{gD_0V\Delta T_0}{W^3T_V}$ (D_0 — начальный диаметр струи, $\Delta T_0 = T_w - T_V$, $\Delta T_0 = T_V - T_w$). В соответствии с этим изучение влияния подъемной силы должно производиться при сохранении определенных значений гидродинамического параметра $\frac{q_V V^2}{q_w W^2}$ или $\frac{T_w V^2}{T_V W^2}$, изменяя при этом D_0 , ΔT_0 или W . В наших опытах менялись начальный диаметр струи D_0 и начальный перегрев ΔT_0 ; скорость поперечного потока W оставалась неизменной. Величина гидродинамического параметра выбиралась в пределах, наиболее соответствующих реальным условиям истечения дымовых струй, и составляла в наших опытах 1; 4; 4,85; 9; 16 и 25. Начальные диаметры струи D_0 были приняты 40 и 60 мм. Диаметр сопел лимитировался сравнительно небольшими размерами аэродинамической трубы, создающей поперечный поток. Сопла же малого диаметра нельзя было использовать из-за значительного убывания влияния подъемной силы на развитие струи, опасности перехода режима истечения струи в ламинарный и трудностей измерений. Величина начального перегрева струи ΔT_0 принималась в основных опытах равной 10, 100 и 200°С. Дальнейшее повышение перегрева нецелесообразно, так как влияние перегрева скачивается через отношение $\Delta T_0/T_V$, которое увеличивается медленнее, чем ΔT_0 ; в то же время повышение перегрева связано со значительными экспериментальными трудностями. Легко видеть, что при выбранных значениях D_0 и ΔT_0 сохранение заметного влияния подъемной силы обусловлено малым значением скорости W (порядка 1 м/сек). В наших опытах она составляла 0,85 м/сек. Изменение значения гидродинамического параметра производилось за счет изменения начальной скорости V и температуры T_V струи.

Экспериментальная установка и методика измерений. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Поперечный воздушный поток создавался в аэродинамической трубе открытого типа с выходным диаметром 700 мм, причем степень неравно-

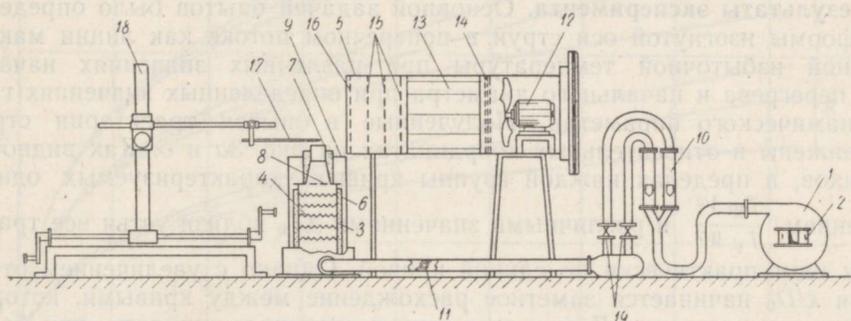


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — центробежный вентилятор; 2 — электродвигатель; 3 — корпус генератора струи; 4 — электронгреватели; 5 — аэродинамическая труба; 6 — изолирующий кожух генератора струи; 7 — сменное сопло; 8 — выравнивающая решетка; 9 — наружный кожух; 10 — ротаметр; 11 — заслонка; 12 — осевой вентилятор с электродвигателем; 13 — обечайка с радиальными перегородками для устранения закрутки потока; 14 — задние выравнивающие решетки; 15 — передние выравнивающие решетки; 16 — проволоочная сетка; 17 — отсосная термопара; 18 — координатор; 19 — краны для регулирования расхода воздуха.

мерности поля скорости на выходе $W_{ср}/W_{max}$ составляли 0,95. Измерение полей скорости основного потока производилось электротермоанемометром ЭТАМ-3А.

Предварительно подогретая электронагревателями струя, имитирующая истечение дымовых газов, подавалась перпендикулярно потоку снизу вверх с помощью отдельного вентилятора. В цепь одного из нагревателей был включен лабораторный автотрансформатор, что позволяло плавно регулировать температуру струи на выходе. Равномерное поле скорости на выходе обеспечивалось коническим поджатием входного участка сопел (степень поджатия составляла 6 для сопла 40 мм и 3,5 — для сопла 60 мм). Чтобы предотвратить падение температуры на периферии выходного сечения сопла за счет теплообмена со стенками, на наружную поверхность цилиндрических участков сопел были намотаны электронагреватели из нихромовой проволоки с регулируемым нагревом, изолированные от металлических стенок сопел листовой слюдой.

Поскольку точное измерение скорости при использовавшихся в опытах низких значениях ее очень трудно, а при подогреве струи выше 100°C вообще еще не освоено, опыты ограничивались измерением температурных полей. Среднее же значение скорости струи на выходе определялось по расходу воздуха, измеряемому достаточно точно с помощью ротаметров.

Для измерения температурных полей использовалась хромель-алюмелевая термопара. Чтобы свести к минимуму погрешность измерения, которая при малых скоростях обтекания воздухом головки термопары может быть довольно значительной, термопара была выполнена с отсосом. Холодный спай ее помещался в поперечный воздушный поток, таким образом, в опытах измерялась избыточная температура струи.

Наибольшее удаление от сопла, на котором производились измерения, ограничивалось двумя факторами. Во-первых, струя должна была находиться в пределах ядра постоянной скорости основного потока, во-вторых, сильный размыв струи на больших расстояниях затруднял точное определение температурного максимума. Поэтому измерения доведены до сечения, отстоящего по горизонтали от центра сопла на 6—8 калибров струи.

Результаты эксперимента. Основной задачей опытов было определение формы изогнутой оси струи в поперечном потоке как линии максимальной избыточной температуры при различных значениях начального перегрева и начального диаметра при определенных значениях гидродинамического параметра. Полученные в опытах траектории струй изображены в относительных координатах на рис. 3а и б. Как видно из рисунков, в пределах каждой группы кривых, характеризующихся одним значением $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$ и различными значениями ΔT_0 вблизи устья все траек-

тории идут практически по единой кривой. Однако с увеличением отношения x/D_0 начинается заметное расхождение между кривыми, которое быстро увеличивается. Кроме того, как и следовало ожидать, при большем значении D_0 расхождение между кривыми также больше.

Вывод о пропорциональности влияния подъемной силы величинам ΔT_0 и D_0 был сделан также в работе [4]. На рис. 4 представлено сравнение результатов наших опытов со струями при $\Delta T_0 = 10^\circ$ (что соответствует условиям, близким к изотермическим) с кривыми максимальной концентрации примеси ненагретой струи, приведенными в [4]. Это сравнение показывает удовлетворительное совпадение наших исследований с данными работы [4] при значениях гидродинамического параметра 4, 9 и

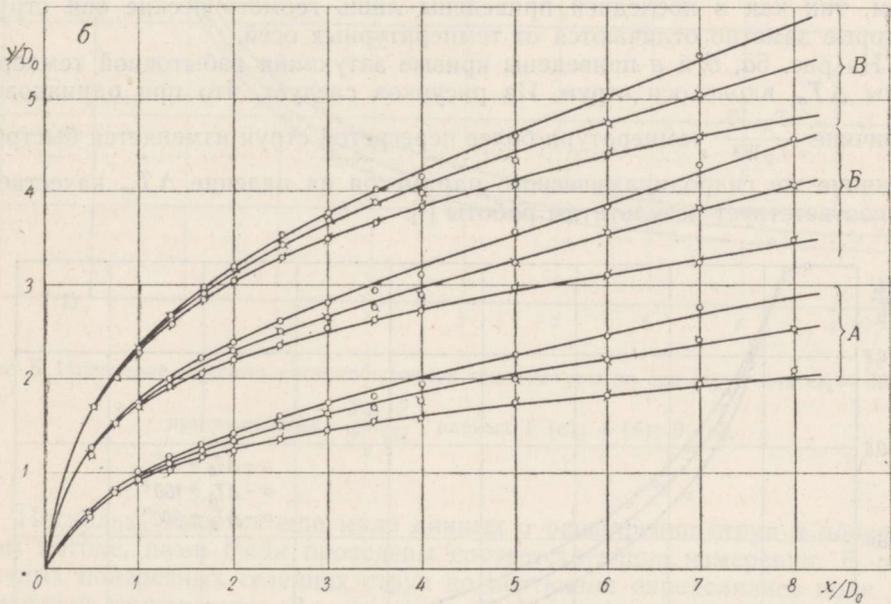
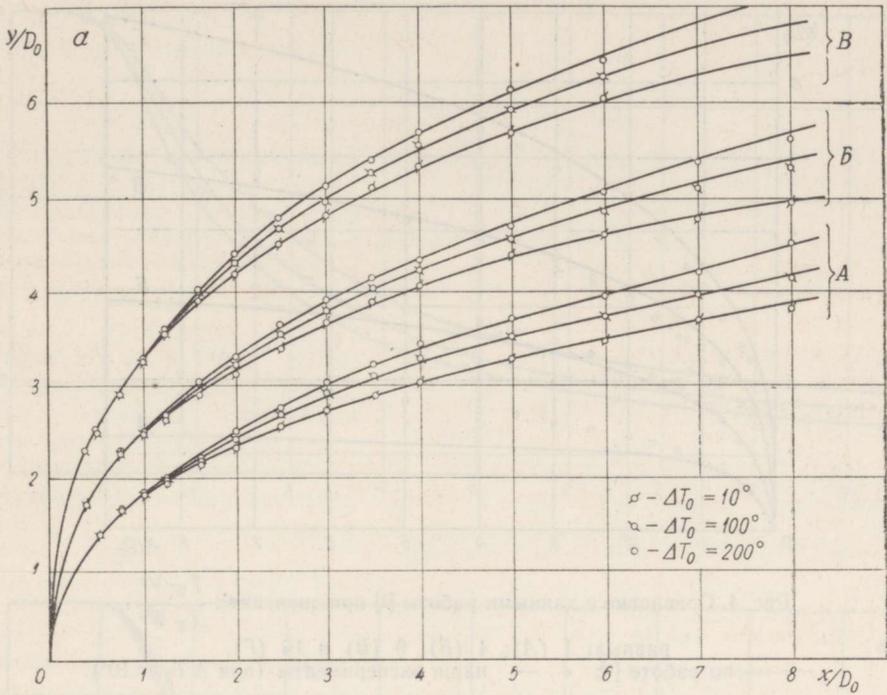


Рис. 3. Линии максимальной избыточной температуры: а — при $D_0 = 40$ мм и значениях $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$, равных 4,85 (А), 9,0 (Б) и 16,0 (В); б — при $D_0 = 60$ мм

и значениях $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$, равных 1,0 (А), 4,0 (Б) и 9,0 (В).

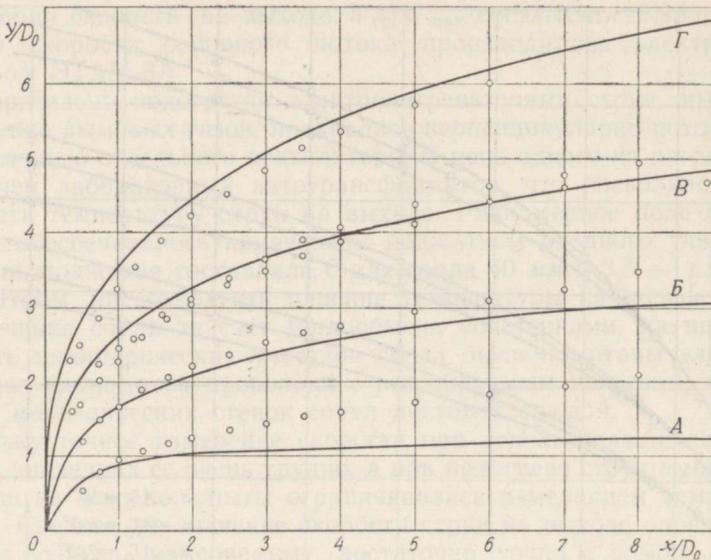


Рис. 4. Сравнение с данными работы [4] при значениях $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$,

равных: 1 (А); 4 (Б); 9 (В) и 16 (Г).

— по работе [4]; \circ — наши эксперименты (при $\Delta T_0 = 10^\circ$).

16. Непосредственное же сравнение траектории перегретых струй из работы [4] с нашими данными не представляется, к сожалению, возможным, так как в последней приведены лишь геометрические оси струй, которые заметно отличаются от температурных осей.

На рис. 5а, б и в приведены кривые затухания избыточной температуры ΔT_m вдоль оси струи. Из рисунков следует, что при одинаковой величине $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$ температура более перегретой струи изменяется быстрее.

Влияние же гидродинамического параметра на падение ΔT_m качественно соответствует результатам работы [1].

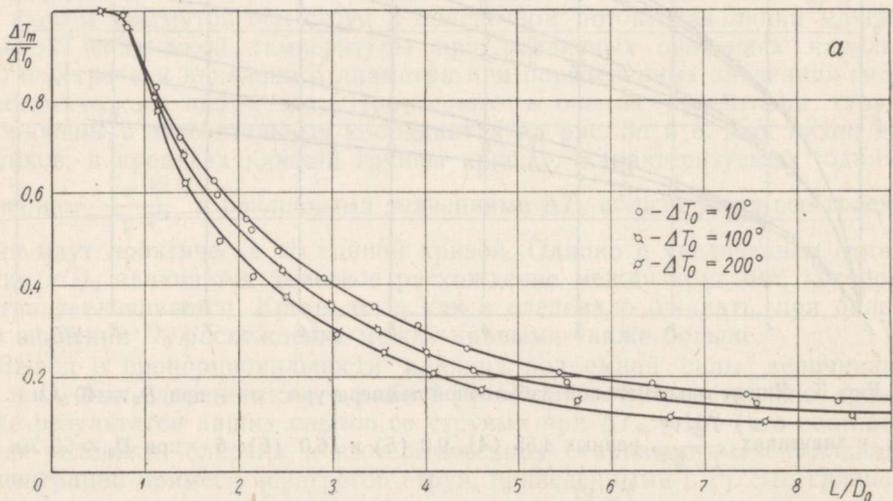


Рис. 5а.

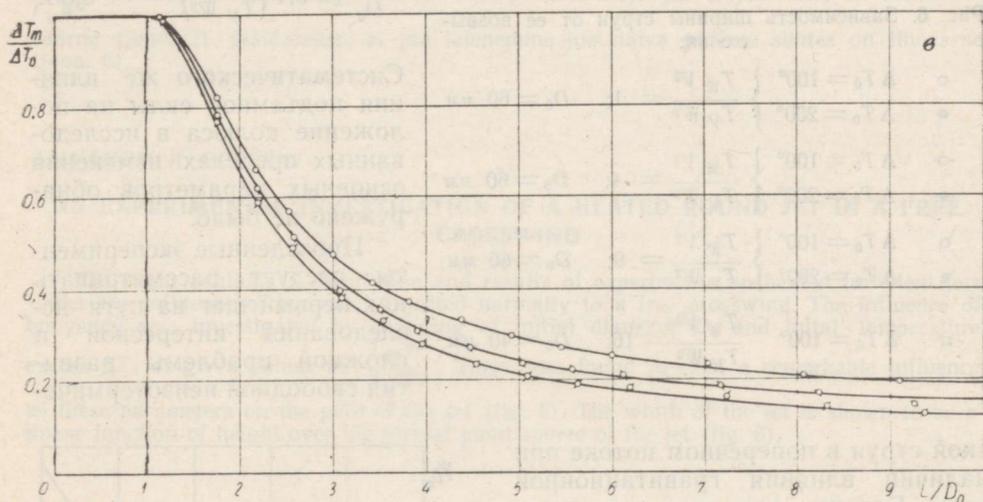
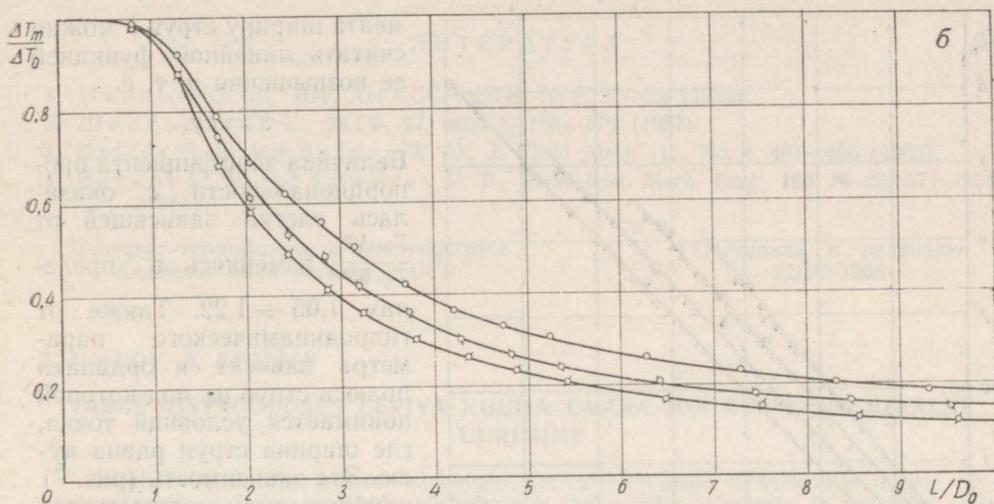


Рис. 5. Изменение максимальной избыточной температуры по оси струи для $D_0 = 60$ мм при значениях $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$, равных 1 (а); 4 (б); 9 (в).

Поскольку имеется еще мало данных о расширении струи в поперечном потоке, нами были проведены соответствующие измерения. В различных поперечных сечениях струи по вертикали определялись поля избыточной температуры. За условную границу струи принималась линия, где избыточная температура составляла $\sim 10\%$ максимальной в данном сечении. Наибольшая ширина струи в данном сечении определялась по горизонтали перпендикулярно направлению поперечного потока. Указанные измерения производились при различных значениях $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$ и при $\Delta T_0 = 100$ и 200° . Как видно из рис. 6, в пределах точности экспери-

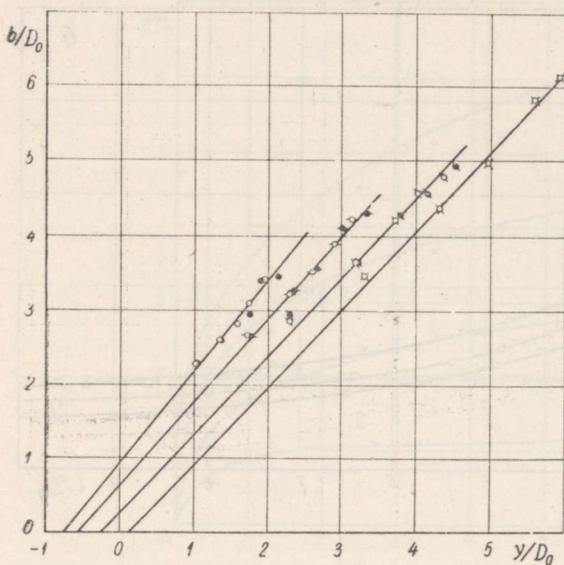
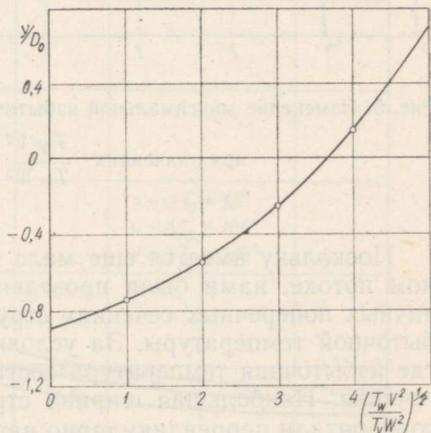


Рис. 6. Зависимость ширины струи от ее возвышения:

- | | | | |
|---|--------------------------|----------------------------------|---------------|
| ○ | $\Delta T_0 = 100^\circ$ | } $\frac{T_W V^2}{T_V W^2} = 1;$ | $D_0 = 60$ мм |
| ● | $\Delta T_0 = 200^\circ$ | | |
| ○ | $\Delta T_0 = 100^\circ$ | } $\frac{T_W V^2}{T_V W^2} = 4;$ | $D_0 = 60$ мм |
| ● | $\Delta T_0 = 200^\circ$ | | |
| ○ | $\Delta T_0 = 100^\circ$ | } $\frac{T_W V^2}{T_V W^2} = 9;$ | $D_0 = 60$ мм |
| ● | $\Delta T_0 = 200^\circ$ | | |
| ○ | $\Delta T_0 = 100^\circ$ | $\frac{T_W V^2}{T_V W^2} = 16;$ | $D_0 = 40$ мм |

екой струи в поперечном потоке при наличии влияния гравитационной силы. Большое практическое значение данной проблемы диктует необходимость дальнейших экспериментальных и аналитических исследований развития струи в поперечном потоке.

Рис. 7. Зависимость ординаты полюса струи от гидродинамического параметра.



мента ширину струи b можно считать линейной функцией ее возвышения y , т. е.

$$b = cy.$$

Величина коэффициента пропорциональности c оказалась слегка зависящей от $\frac{T_W V^2}{T_V W^2}$, изменяясь в пределах $1,05 \div 1,22$. Также от гидродинамического параметра зависит и ордината полюса струи y_0 , под которой понимается условная точка, где ширина струи равна нулю. Эта зависимость (рис. 7) приближенно описывается формулой

$$\frac{y_0}{D_0} = 0,1 \left(\frac{T_W V^2}{T_V W^2} \right)^{0,825} - 0,85.$$

Систематического же влияния подъемной силы на положение полюса в исследованных пределах изменения основных параметров обнаружено не было.

Проведенные эксперименты следует рассматривать как первый шаг на пути исследования интересной и сложной проблемы развития свободной неизотермиче-

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Ю. В., Изв. АН СССР. ОТН, № 8, 37—52 (1954).
2. Шандоров Г. С., ЖТФ, 27, вып. 1, 156—179 (1957).
3. Keffer G. F. and Baines W. D., J. Fluid Mech., 15, No. 4, 481—496 (1963).
4. Bryant L. W. and Cowdrey C. F., Proc. Inst. Mech. Eng., 169, № 23, 371—384 (1955).

Институт термofизики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
22/VI 1965

J. IVANOV, A. EPSTEIN

VABAS RISTVOOLUSES LEVIVA KUUMA ÜMARA JOA EKSPERIMENTAALNE UURIMINE

Artiklis kirjeldatakse vabas ristvooluses levivate kuumade turbulentsete jugade eksperimentaalset uurimist, arvestades tõstejõudude olulise mõju olemasolu, ja esitatakse selle tulemused.

Tõstejõu mõju uuriti, muutes düüsi algläbimõõtu D_0 ja temperatuuride vahet ΔT_0 antud $\frac{T_w V^2}{T_v W^2}$ väärtuste juures. Leiti, et nende parameetrite mõju joa trajektoorile on märkimisväärne (joon. 3). Näidatakse, et joa laienemine joa näiva pooluse suhtes on lineaarne (joon. 6).

J. IVANOV, A. EPSTEIN

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A HEATED ROUND JET IN A FREE CROSSWIND

The paper contains a description and results of experiments on heated turbulent jets under the influence of buoyancy injected normally to a free crosswind. The influence of buoyancy was investigated by changing of initial diameter D_0 and initial temperature excess ΔT_0 at given values of $\frac{T_w V^2}{T_v W^2}$. There was found to exist a remarkable influence of these parameters on the path of the jet (fig. 3). The width of the jet is shown to be a linear function of height over the virtual point-source of the jet (fig. 6).