

О ДОПУЩЕНИЯХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ ДВУХФАЗНОЙ СТРУИ

М. К. ЛААТС, Ф. А. ФРИШМАН

(Таллин)

Для аналитического описания двухфазной струи (струи, содержащей примесь в виде капель или твердых частиц) наиболее приемлемым в настоящее время является метод решения интегральных соотношений пограничного слоя в сочетании с заданными заранее универсальными функциями распределения осредненных параметров в поперечных сечениях струи. Таких соотношений два:

закон сохранения суммарного импульса

$$\int_0^R \rho u^2 dF + \int_0^R g w dF = I_0 \quad (1)$$

закон сохранения массы примеси

$$\int_0^R g dF = G_0 \quad (2)$$

Замыкает систему уравнение расширения, полученное на базе определенных допущений о структуре турбулентности струи и влиянии на нее тех или иных факторов. Влияние каждого фактора можно представить в виде множителя φ_i , тогда уравнение расширения выглядит так:

$$\frac{dR}{dx} = \prod_{i=1}^n \varphi_i \quad (3)$$

Г. Н. Абрамович [1], рассматривая двухфазную струю как однородную смесь плотностью $\rho_0 = \rho(1 + \kappa)$, предложил использовать для ее расчета теорию струи переменной плотности. Соответственно, уравнение расширения имеет вид

$$\frac{dR}{dx} = c \frac{1 + 0.5\kappa_m}{1 + \kappa_m} \quad (4)$$

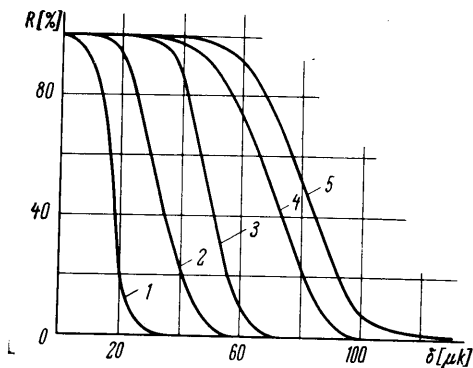
В приведенных соотношениях и в дальнейшем u — скорость несущей фазы, w — скорость примеси, g — удельный расход примеси [$\text{кг} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$], κ — концентрация примеси (отношение кг примеси к кг воздуха), x — расстояние от среза сопла, r — текущий радиус, r_0 — радиус сопла, $r_{0.5u}$ — расстояние от оси струи до точки с половинной скоростью, $r_{0.5g}$ — расстояние от оси струи до точки с половинным расходом, I_0 — суммарный начальный импульс, G_0 — расход примеси, δ — размер частиц.

Индексы m — осевые значения, нуль — начальные значения, $0m$ — максимальные значения на выходе из сопла, градус — среднерасходные значения на выходе из сопла.

Однако в работе [2] было показано, что расширение двухфазной струи существенно меньше, чем это следует из уравнения (4) и имевшихся в то время данных по рассеиванию инерционной примеси [3, 4]. Различие эксперимента и расчета объяснялось дополнительным влиянием примеси на турбулентность струи и выразилось в появлении третьего множителя в уравнении (4).

Достоверность этого предположения зависит от достоверности определения κ_m , т. е. от знания закономерностей рассеивания инерционной примеси в объеме струи. Опыты [3, 4], хотя и показали отличие рассеивания инерционной примеси от газообразной, не позволили четко установить его закономерности, так как измерения проводились в отдельных сечениях для примесей случайного дисперсного состава.

Таким образом, для физически обоснованного решения задачи о развитии двухфазной струи необходимы были систематические экспериментальные ис-

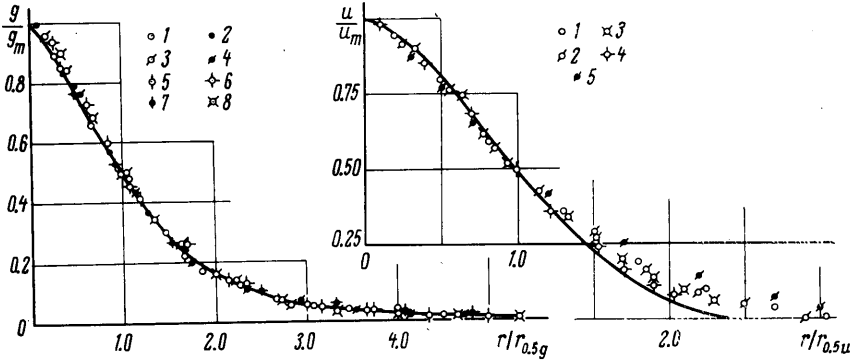


Фиг. 1

следования как динамики струи, так и особенностей рассеивания в ней возможно более однородных примесей различного дисперсного состава.

Ниже приводятся результаты такого исследования в том плане, в каком они могут быть использованы для уточнения методики расчета двухфазной струи.

Схема опытов. Смесь воздуха и сравнительно однородных корундовых порошков подавалась из длинной разгонной трубы диаметром 35 мм в свободное пространство. Дисперсный состав порошков представлен на фиг. 1, где кривым 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют примеси с характерным размером 17, 32, 49, 72 и 80 мк. Этот размер используется в дальнейшем для обозначения порошка. С помощью изокинетических отсосных трубок $\Phi = 2$ мм отбирались пробы в различных точках струи. Отбираемый воздух проходил через ротаметр, а твердая примесь выделялась на фильтре и через определенное время взвешивалась. По показаниям ротаметров и данным тарировки определялась скорость воздуха в данной точке u , а по результа-



Фиг. 2

Фиг. 3

там взвешивания — расход примеси через единицу поперечного сечения, в дальнейшем именуемый удельным расходом $g[\text{кг} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}]$.

Начальные условия. При малых начальных концентрациях примеси $\kappa_0 = 0-0.5$ профиль скорости воздуха на выходе из трубы был близок к турбулентному ($u_{0m}/u^0 \approx 1.25$). С увеличением загрузки потока примесью при $\kappa_0 \sim 0.7$ происходит выравнивание профиля скорости ($u_{0m}/u^0 \approx 1$).

Распределение примеси на выходе оказалось более неравномерным. С увеличением концентрации данной примеси начальная неравномерность распределения растет (для примеси 32 и $\kappa_0 = 0.3, 0.56, 0.77, g_{0m}/g^0 = 1.52, 1.57$ и 1.60 соответственно), а при данной загрузке уменьшается с уменьшением крупности примеси. Например, при $\kappa_0 = 0.3 g_{0m}/g^0 = 1.60, 1.56, 1.52$ и 1.3 для примесей 80, 72, 32 и 17 соответственно. Таким образом, в интервале κ_0 от 0.1 до 0.7 изменения начальных профилей невелики и, чтобы исключить существенное влияние начальной неравномерности на развитие струи, исследования проводились в основном в этом диапазоне изменения κ_0 .

Подобие. Интегрирование уравнений (1), (2) существенно облегчается при наличии подобия профилей u/u_m и g/g_m . Опыты показали, что в двухфазной струе четко выражено лишь подобие профилей относительного удельного расхода в координатах

$$g/g_m = f(r/r_{0.5g})$$

Форма универсального профиля не зависит ни от начальной скорости, ни от начальной концентрации примеси, ни от гидравлической крупности частиц во всем исследованном диапазоне их изменения и может быть аппроксимирована функцией

$$g/g_m = \exp[-0.7(r/r_{0.5g})^{1.33}]$$

При $\kappa_0 = 0.1-1.0$ подобие начинается на расстоянии порядка $x/r_0 = 20$. По признаку подобия профилей удельного расхода примеси двухфазную струю можно разделить на два участка: начальный и основной.

На фиг. 2 приведен профиль удельных расходов примеси; точкам 1, ..., 8 соответствуют следующие комбинации значений ($\kappa_0, x/r_0$):

- 1(0.3, 22.8), 2(0.3, 57.1), 3(1.4, 45.6), 4(0.56, 34.3), 5(0.4, 34.3),
- 6(0.3, 17.1), 7(0.8, 45.6), 8(0.3, 34.3)

Вопреки ожиданиям профили относительной скорости несущей фазы оказались не универсальными в различных поперечных сечениях, причем не только вблизи сопла, где происходит естественная деформация начальных полей в струйные, но и в основном участке, где достаточно выражено подобие профилей относительного расхода. Это может быть объяснено обменом импульсом между фазами, более интенсивным вблизи оси струи и меньшим у ее границ. По мере рассеивания примеси и выравнивания скоростного поля обмен импульсом уменьшается, и профиль относительной скорости в координатах

$$u/u_m = f(r/r_{0.5u})$$

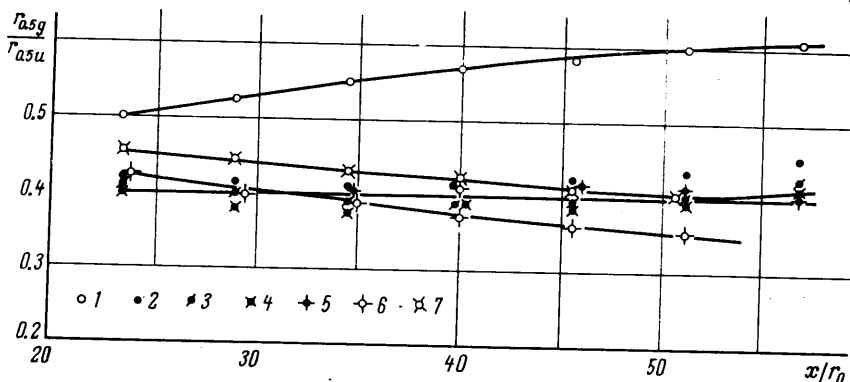
стремится к профилю, характерному для однофазной струи. Деформация профиля относительной скорости в струе с примесью 32 при $x_0 = 0.56$ показана на фиг. 3. Точкам 1, 2, 3, 4 соответствуют значения $x/r_0 = 22.8, 34.3, 45.6, 57.1$. Там же для сравнения приведен профиль в сечении $x/r_0 = 34.3$ при $x_0 = 1.4$ (точки 5). Сплошная кривая — профиль скорости однофазной струи.

Деформация профилей относительной скорости в исследованном диапазоне невелика и ее удалось обнаружить четко только в случае мелкой относительно быстро рассеивающейся примеси 17 и в меньшей степени для порошка 32. С увеличением размера частиц замедляется обмен импульсом, медленнее деформируется профиль скорости. На фиг. 4 видно, что уже для порошка 49 при $x_0 = 0.4$ в сечениях $x/r_0 = 22.8, 34.3, 45.6, 57.2$ (точки 1, 2, 3, 4) профиль относительной скорости, по существу, универсальный, хотя и отличается от профиля скорости однофазной струи (сплошная линия).

С увеличением начальной концентрации примеси увеличивается импульс, передаваемый несущей фазе, а с ним и деформация профиля скорости на данном расстоянии от среза сопла.

Отсутствие подобия существенно усложняет анализ двухфазной струи. Однако деформация профиля невелика, поэтому можно принимать профиль скорости универсальным, выбирая аналитическое выражение для него с учетом начальной концентрации и удаления участка от среза сопла. Ошибка от такого упрощения тем меньше, чем

на участках определенной длины



Фиг. 5

крупнее примесь и короче участок. При решении практических задач, связанных с точечной техникой, исследуется, как правило, сравнительно небольшой участок, поэтому допущение о подобии профилей относительной скорости к существенной ошибке не приведет.

До сих пор предполагалось, что в двухфазной струе, как и в однофазной, подобны профили относительной концентрации. Если пренебречь относительной скоростью движения фаз, то

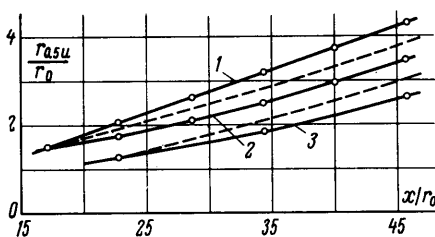
$$\kappa_m/\kappa = \frac{g/g_m}{u/u_m} = \frac{f_1(r/r_{0.5g})}{f_2(r/r_{0.5u})} \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что профиль κ/κ_m может быть универсальным при универсальных u/u_m и g/g_m , если отношение

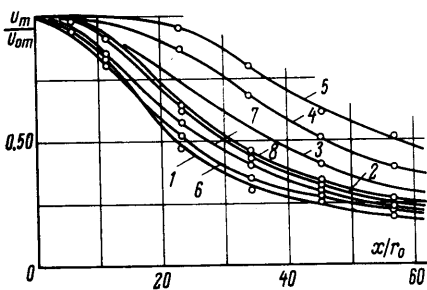
$$m = \frac{r_{0.5g}}{r_{0.5u}}$$

не меняется от сечения к сечению, как это имеет место при рассеивании газообразной примеси. Однако в двухфазной струе отношение половинных радиусов меняется по длине струи в зависимости от дисперсного состава примеси. Это видно на фиг. 5, где точкам 1, ..., 7 соответствуют следующие значения крупности и κ_0 : 1(17, 0.3), 2(32, 0.3), 3(32, 0.56), 4(32, 0.77), 5(32, 1.4), 6(72, 0.3), 7(80, 0.3). Прямые построения также подтверждают отсутствие подобия профилей концентрации. Характер их деформации зависит от характера изменения m , следовательно, от размеров частиц. Для мелкой примеси 17 с увеличением x/r_0 профили относительной концентрации $\kappa/\kappa_m = f_3(r/r_{0.5u})$ расширяются, для крупной 80 сужаются и лишь в частном случае 32 остаются примерно универсальными.

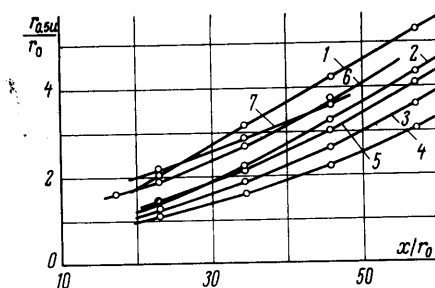
Процессы переноса в двухфазной струе. Ранее отмечалось, что расширение двухфазной струи отличается от расширения однофазной. Вполне естественно было предположить, что это различие вызвано особенностями рассеивания инерционной примеси, и рассматривать двухфазную струю как струю переменной плотности, но в отличие от [4] со специфическим распределением примеси. Расширение такой струи можно задать уравнением (4). Осталось выяснить, является ли осевая концентрация параметром, определяющим однозначно расширение двухфазной струи. Для этого было поставлено несколько опытов, в процессе которых оставался неизменным один из трех режимных параметров G_0, u_0, κ_0 при изменении остальных во всем возможном диапазоне. Опыты показали, что при данной крупности одинаковое изменение осевой концентрации обуславливало одинаковое расширение струи. Следовательно, расширение двухфазной струи так же, как и струи переменной плотности зависит от осевой концентрации. Однако, как видно из фиг. 6, двухфазная струя (кривая 2 — примесь 49, $\kappa_0 = 0.4$ и



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

кривая 3 — примесь 32, $\kappa_0 = 0.56$) расширяется существенно медленнее однофазной струи (кривая 1) и струи переменной плотности с таким же распределением концентрации вдоль оси (штриховые линии). (Линии половинной скорости струи переменной плотности построены по уравнению (4) и совмещены с линией половинной скорости двухфазной струи в точке, где начинается подобие.)

Расположение кривых на фиг. 6 показывает, что особенности распределения примеси в двухфазной струе влияют на ее расширение, однако значительная доля влияния примеси не может быть объяснена ни с точки зрения теории струи переменной плотности, ни с точки зрения иных известных полумпирических гипотез, а лишь дополнительным подавляющим влиянием инерционной примеси на структуру турбулентности струи.

Согласно опытным данным затухание осевой скорости двухфазной струи существенно зависит от размеров частиц. Чем мельче примесь, тем большее влияние она оказывает на развитие струи вблизи сопла. Это видно из фиг. 7, где линии 2, ..., 8 соответствуют следующим значениям крупности и начальной концентрации: 2(32, 0.3), 3(32, 0.56), 4(32, 0.77), 5(32, 1.4), 6(72, 0.3), 7(49, 0.3), 8(17, 0.56), а линия 1 — затухание осевой скорости однофазной струи.

Те же тенденции обнаруживаются на фиг. 8, где приведены линии половинной скорости двухфазной струи: 2(32, 0.3), 3(32, 0.56), 4(32, 0.77), 5(17, 0.3), 6(72, 0.3), 7(80, 0.3) и однофазной — 1.

Линия половинной скорости самого мелкого порошка 17 расположена ниже всех, самого крупного 80 — выше. Однако масса частиц порошка 17 в среднем в 100 раз меньше массы частицы порошка 80, и даже при общем более низком уровне турбулентности мелкие частицы могут рассеиваться интенсивнее. Действительно, из фиг. 9, где приведены линии половинных расходов: 1(32, 0.3), 2(32, 0.56), 3(32, 0.77), 4(32, 1.4), 5(17, 0.3), 6(72, 0.3), 7(80, 0.3), — видно, что вблизи сопла крупная примесь рассеивается более интенсивно. Однако по мере удаления от среза сопла рассеивание примеси приближается к естественному. Под естественным понимается более интенсивное рассеивание мелкой примеси. Эта особенность рассеивания видна и на положении линий половинной скорости (фиг. 8). Чем мельче примесь, тем быстрее наклон кривой стремится к наклону линии половинной скорости воздушной струи, тем быстрее уменьшается влияние примеси на струю. С увеличением начальной концентрации расширение струи замедляется (фиг. 8), замедляется и перенос примеси (фиг. 9).

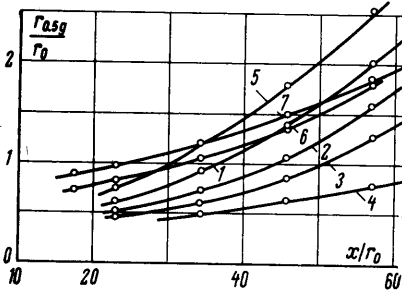
Таким образом, инерционная примесь оказывает подавляющее влияние на процессы турбулентного переноса импульса, и примеси в струе тем больше, чем больше ее концентрация и меньше размер частиц, т. е. чем больше суммарная поверхность частиц. С другой стороны, инерция частиц является одним из факторов, обуславливающих распределение примеси в объеме струи и тем самым влияние переменной плотности на ее развитие. Аналитически это на основании опытных данных может быть выражено так:

$$\frac{dR}{dx} = c \frac{1 + 0.5\kappa_m}{1 + \kappa_m} \frac{f(\delta)}{1 + 0.5\kappa_m} = c \frac{f(\delta)}{1 + \kappa_m} \quad (6)$$

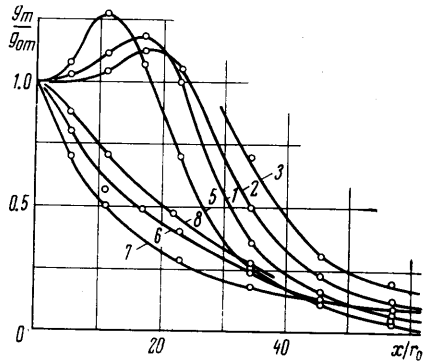
Последний множитель определяет влияние примеси на турбулентность струи. Для порошка 32 $f(\delta) = 1$.

Движение частиц в струе. Для решения системы (1), (2) и (6) необходима информация о связи продольных осредненных скоростей несущей фазы u и примеси w . Как правило, они принимаются равными [1]. Расчеты относительной скорости движения фаз по известной методике [5] с учетом полученных экспериментальных данных показали, что при интегрировании уравнения (1) в основном участке для $\delta < 100 \mu k$ ею действительно можно пренебречь. Однако вблизи сопла даже сравнительно небольшие значения относительной скорости обуславливают появление весьма заметных эффектов. В частности, многие исследователи обнаруживали вращение частиц в струе [3]. Можно предположить, что это вращение упорядоченное, так как вызвано движением частиц в градиентном потоке. Вычисленные с учетом этого предположения скорости вращения согласуются с наблюдениями. Относительное продольное вращение может обусловить появление поперечного движения частиц, вызванного эффектом Магнуса. Непосредственно это движение не наблюдалось, однако косвенно о нем свидетельствует ничем не объяснимый подъем кривых затухания осевого удельного расхода в начальном участке струи (фиг. 10): 1(32, 0.3), 2(32, 0.56), 3(32, 0.77), 5(17, 0.3), 6(72, 0.3), 7(80, 0.3), 8(49, 0.3), — заметный для мелкой примеси.

Приведенные выше результаты экспериментального исследования двухфазной струи показали, что картина течения в ней сложнее существующих представлений. Целый ряд эффектов, связанных с наличием относительных движений фаз — осредненного и пульсационного, обуславливают отсутствие подобия полей концентрации и, строго говоря, скорости, влияние примеси на структуру турбулентности и особенности распределения примеси в объеме струи. Однако все это не исключает



Фиг. 9



Фиг. 10

возможности расчета развития двухфазной струи по крайней мере в основном участке, сначала с помощью эмпирических уравнений типа (6), затем, вероятно, будут созданы полуэмпирические теории турбулентности свободных двухфазных потоков. Одним из необходимых путей для создания и совершенствования методики расчета являются дальнейшие подробные экспериментальные исследования как осредненных, так и пульсационных характеристик двухфазной струи.

Поступило 14 IX 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
2. Лаатс М. К. Экспериментальное исследование динамики пылевоздушной струи. Инж.-физ. ж., 1966, т. 10, № 1.
3. Кубынин И. Е. Исследование аэродинамики свободной струи запыленного воздуха. Изв. ВТИ, 1951, № 1.
4. Brusdeylins G., Tillmann W. Experimentelle Untersuchung des Verhaltens von berachbarten, teils feststoffbeladenen Luftfreistrahlen. Mitt. VGB, 1962, Н. 81.
5. Чернов А. П. К вопросу о влиянии твердых примесей на скорость движения свободной пылевоздушной струи. Ж. техн. физ., 1956, т. 26, вып. 5.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ШАРА И ПЛАСТИНЫ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

В. Х. АВЛЕЕВА

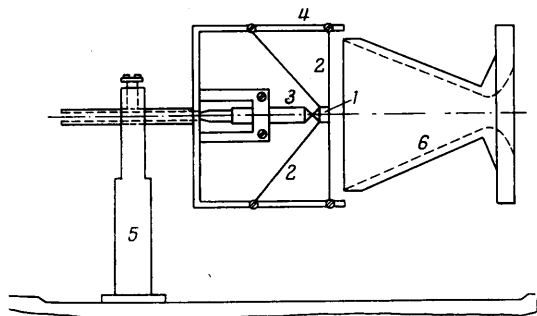
(Москва)

Приводятся результаты экспериментального изучения среднего конвективного теплообмена шара и пластины при нулевом угле атаки в условиях сверхзвукового потока низкой плотности.

Измерениями на шаре охвачен диапазон параметров $3.6 < M < 6.1$ и $5 < R < 400$ и на пластине — $3.6 < M < 6.1$ и $5 < R < 65$.

1. На аэродинамической трубе низкой плотности, описанной в работах [1, 2], одновременно с изучением аэродинамики проводилось изучение теплообмена. Для создания сверхзвукового потока использовались те же сопла, что и в работах [3, 4]. Рабочим газом служил осушенный воздух. Подогрев газа в ресивере отсутствовал.

2. Экспериментальные модели были сделаны из меди. Использование меди в качестве материала модели обуславливалось ее высокой теплопроводностью, которая обеспечивает быстрый и равномерный нагрев модели в потоке. Температура модели измерялась термистором. Схема измерения температуры модели термистором, способ его заделки в модель, тип термистора в описываемых экспериментах были предложены Н. А. Колоколовой. Ею же проведены многократные тарировки датчика температуры. Для изучения теплообмена шара было изготовлено пять моделей. Четыре модели диаметрами $D = 2, 4, 8, 12$ мм состояли из двух полушаровых частей: медной, обращенной к потоку, и эбонитовой, дополняющей до целого шара (задняя часть модели). Одна модель диаметром $D = 4$ мм была сделана целиком из меди. В центре медной полусферы высверливалось отверстие, в которое вставлялась головка термистора. Это место заливалось аквадаком для надежности теплового контакта. Провода от термистора выводились через отверстие в эбонитовой части, сделанное по радиусу, который перпендикулярен медной части модели, и далее шли через донную полую стеклянную державку к прибо-



Фиг. 1