

УДК 532.529

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ

ЗУЕВ Ю. В., ЛЕПЕШИНСКИЙ И. А., СОВЕТОВ В. А.

Математическая модель осесимметричной двухфазной турбулентной струи [1] позволяет рассчитывать полидисперсные струйные течения с учетом скоростной неравновесности фаз и полидисперсности капель дискретной фазы при наличии их коагуляции и дробления и при произвольной форме начальных полей параметров фаз. Система дифференциальных уравнений, описывающих двухфазную струю, включает уравнение количества движения дискретной фазы в проекции на радиус струи, что позволяет вычислять поперечную скорость частиц, которая ранее принималась равной поперечной скорости газа. Замыкание системы осредненных уравнений осуществляется с помощью разработанной в рамках теории пути перемешивания Праудтля модели взаимодействия частиц с турбулентным газовым потоком, являющейся развитием работы [2]. Достоинство этой модели в ее относительной простоте и в том, что расчет двухфазной струи проводится с использованием одной константы, известной из теории однофазных струй. При расчете весь диапазон размеров капель разбивается на классы и проводится расчет параметров каждого класса.

Математическая модель двухфазной струи [1], как и любая теория, требует экспериментальной проверки. Но в литературе отсутствуют необходимые данные по экспериментальному исследованию газожидкостных полидисперсных турбулентных струй.

В связи с этим было проведено экспериментальное исследование газочапельной турбулентной изотермической полидисперсной струи, некоторые результаты которого приводятся ниже и сравниваются с данными теоретического расчета, выполненного по модели [1].

Объектом исследования была струя воздуха с каплями воды, истекающая из специально спроектированного смесительного устройства с внутренним диаметром 20 мм. Смесительное устройство представляло собой цилиндрический участок с установленной в его торцевой поверхности акустической форсункой [3]. Воздух, необходимый для создания заданной концентрации капель в водовоздушной смеси, подавался параллельно оси смесительного устройства через цилиндрическую щель, окружающую форсунку.

При измерении параметров двухфазных течений возникают существенные трудности, связанные с наличием в потоке нескольких фаз, имеющих различные плотности, скорости, концентрации и т. д. Трудно назвать один метод, с помощью которого можно было бы измерить сразу все параметры двухфазного потока; каждый метод позволяет измерять какую-то группу параметров и дополняет другие методы.

В эксперименте использовались следующие методы измерения.

Газодинамический метод [4], позволяющий измерять скорость газа  $u$ , суммарную объемную концентрацию  $c_{i\Sigma}$  и среднюю по количеству движения скорость капель  $u_{ic}$

$$c_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^N c_i, \quad u_{ic} = \frac{\sum_{i=1}^N c_i u_i^2}{\sum_{i=1}^N c_i u_i}$$

Здесь  $c_i$  и  $u_i$  — объемная концентрация и скорость капель  $i$ -го класса,  $N$  — количество классов капель.

Измерения этим методом проводятся с помощью зонда, аналогичного трубке Пито, внутри которого вблизи его входного отверстия измеряется статическое давление. В режиме отбора пробы, при котором статическое давление внутри зонда равно статическому давлению в исследуемой точке потока, осуществляется отсос отобранной пробы через зонд с последующей сепарацией фаз и измерением их массовых расходов. Затем зонд заполняется водой, его выходное сечение перекрывается и измеряется давление внутри зонда, которое определяется количеством движения двухфазной смеси в области измерения. Решив совместно уравнение равновесия сил на поверхности, проходящей через срез зонда, уравнения расхода фаз и уравнение, связывающее площади, занимаемые фазами, с площадью внутреннего отверстия зонда, можно найти среднюю скорость частиц, скорость газа и концентрацию фаз. Погрешность измерения скоростей фаз этим методом зависит от концентрации жидкой фазы в потоке: она уменьшается при увеличении концентрации капель. При объемной концентрации дискретной фазы  $c_i = 2 \cdot 10^{-4}$  погрешность измерения средней скорости капель равна 30%, а погрешность измерения скорости газа — 12%. При увеличении объемной концентрации капель до  $10^{-3}$  погрешность измерения средней скорости капель уменьшается до 15%, а погрешность измерения скорости газа — до 3%.

Оптический метод индикатрисы рассеяния света [5] позволяет измерять функцию распределения концентрации капель по размерам, а оптический метод интегрирующей диафрагмы [3] дает информацию о суммарной объемной концентрации капель  $c_{\Sigma}$  и о среднем объемно-поверхностном диаметре

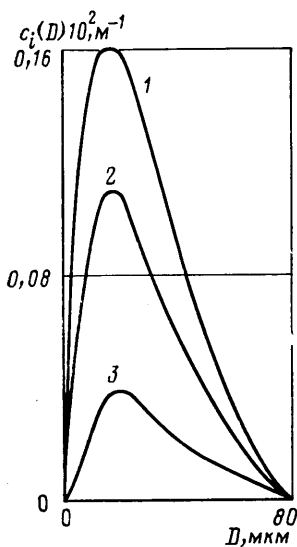
$$D_{ic} = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{D_i}}$$

где  $D_i$  — диаметр капель  $i$ -го класса.

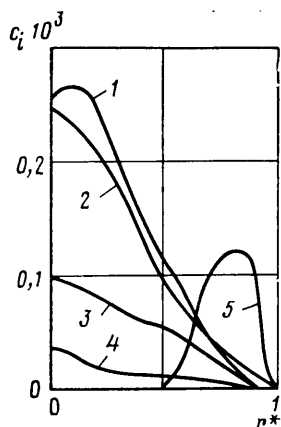
Эти два метода являются вариантами метода малых углов, который основан на измерении распределения светового потока, рассеянного грубодисперсными частицами вперед под малыми углами относительно направления падающего излучения. Зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния называется индикатрисой рассеяния света. Для частиц, удовлетворяющих условиям  $\pi D_i / \lambda \gg 1$  и  $2|m-1| \pi D_i / \lambda \gg 1$  ( $m$  — показатель преломления вещества частиц,  $\lambda$  — длина волны излучения), получено интегральное уравнение [5], позволяющее по измеренной индикатрисе рассеяния света рассчитывать функцию распределения концентрации частиц по размерам. В эксперименте индикатриса рассеяния света (точнее, произведение квадрата угла рассеяния на интенсивность света) измерялась с помощью устройства, имеющего два диска: неподвижный диск с отверстием в виде кругового сектора и вращающийся диск с отверстиями, площадь которых изменялась пропорционально углу рассеяния. Измерения световых потоков проводились в момент совмещения отверстий на двух дисках. По литературным данным, погрешность определения спектра размеров частиц методом индикатрисы рассеяния света составляет 10–15%.

В отличие от метода индикатрисы рассеяния света метод интегрирующей диафрагмы позволяет измерять только средний размер частиц и их суммарную объемную концентрацию. Но этот метод в приборной реализации и обработке экспериментальных данных намного проще метода индикатрисы рассеяния света и дает возможность получать информацию о параметрах течения в темпе эксперимента. В этом методе измеряются световые потоки рассеянного на частицах света, прошедшего через две диафрагмы, одна из которых представляет собой щель, а вторая — круговой сектор. Световой поток, прошедший через щелевую диафрагму, пропорционален объемной концентрации частиц, а световой поток, прошедший через диафрагму, выполненную в виде сектора, пропорционален суммарной поверхности частиц. Умножив отношение измеренных световых потоков на известный коэффициент, зависящий от длины волны излучения и геометрических параметров диафрагм, можно сразу найти значение объемно-поверхностного диаметра. Погрешность измерения объемной концентрации и суммарной площади частиц методом интегрирующей диафрагмы составляет 5%, а среднего диаметра — 10%.

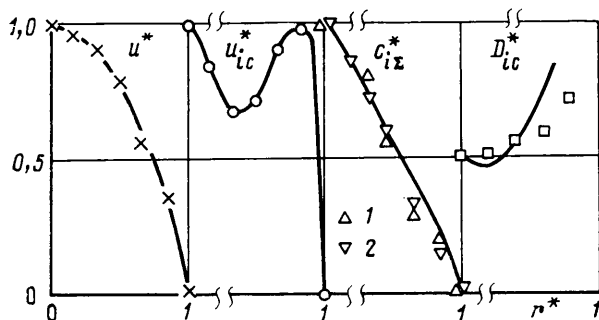
Особенностью метода малых углов является то, что в фотоприемник попадает свет, рассеянный всеми частицами, расположенными в потоке по ходу луча. Это значит, что измеряются параметры дискретной фазы, осредненные по длине луча, проходящего через поток. Для определения распределения параметров потока по его радиусу (т. е. измерения местных значений) может быть использована формула Абеля [6], связывающая в случае осесимметричного течения радиальное распределение световых потоков рассеянного света с их интегральными значениями вдоль луча, освещающего поток. В данной работе измерялись световые потоки, рассеянные каплями, распределенными в потоке по всей длине луча, и по этим данным с помощью формулы Абеля рассчитывались световые потоки, рассеянные цилиндриче-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

скими объемами двухфазной среды единичной длины, расположенными на известных расстояниях от оси потока. По определенным с помощью формулы Абея световым потокам рассчитывалось радиальное распределение параметров капель.

Для определения размера и концентрации крупных капель (более 30–50 мкм) использовалась фотография.

Подобие полей параметров газа и капель в поперечных сечениях струи оценивалось с помощью относительных показателей эксцесса, использовавшихся для этой цели в [1].

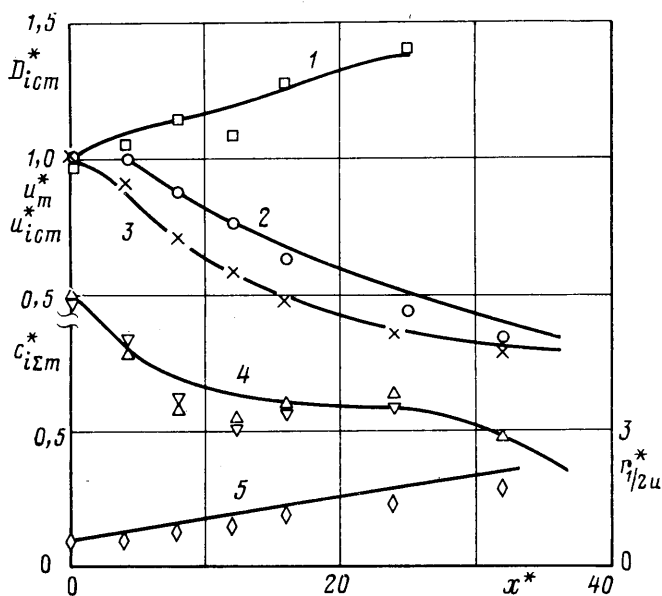
Для расчета двухфазной струи необходимо знать изменение в начальном сечении струи скорости газа, объемных концентраций и скоростей отдельных классов капель.

Функции распределения объемной концентрации капель по размерам измерялись с помощью индикатрисы рассеяния света в шести точках радиуса начального сечения струи. Результаты этих измерений для  $r^*=0$ ; 0,333 и 0,667 (кривые 1–3) изображены на фиг. 1. В качестве относительного радиуса  $r^*$  принято отношение текущего радиуса  $r$  к радиусу границы струи  $r_0$ . Так как измерения на срезе смесительного устройства были затруднены, за начальное сечение струи принято сечение диаметром 24 мм, отстоящее от среза смесительного устройства на расстоянии 5 мм. Весь диапазон изменения размера капель от 0 до 80 мкм был разбит на четыре интервала (выделены четыре класса) с характерными диаметрами капель 10, 30, 50 и 70 мкм. Для каждого класса капель по измеренным функциям

распределения объемной концентрации капель по размерам рассчитывались объемные концентрации капель выделенных классов, т. е. непрерывные функции распределения заменялись гистограммами.

В результате этого было получено изменение по радиусу струи объемной концентрации капель четырех классов, представленное графически на фиг. 2. Кривые 1—4 соответствуют диаметру капель в 10, 30, 50 и 70 мкм. На фотографиях течения, полученных с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса 5 мкс, было зафиксировано дробление жидкой пленки, стекающей со стенок смесительного устройства. Результатом этого дробления было наличие крупных капель размером 300 мкм вблизи границ струи. Изменение объемной концентрации этих капель по радиусу струи изображено на фиг. 2 кривой 5.

Изменение скорости газа  $u^*$  в начальном сечении струи, измеренное газодинамическим методом, показано в левой части фиг. 3. Сплошной кривой изображено поле скорости газа, которое использовалось при расчете



Фиг. 4

струи. Абсолютное значение скорости газа на оси начального сечения струи равно 54 м/с.

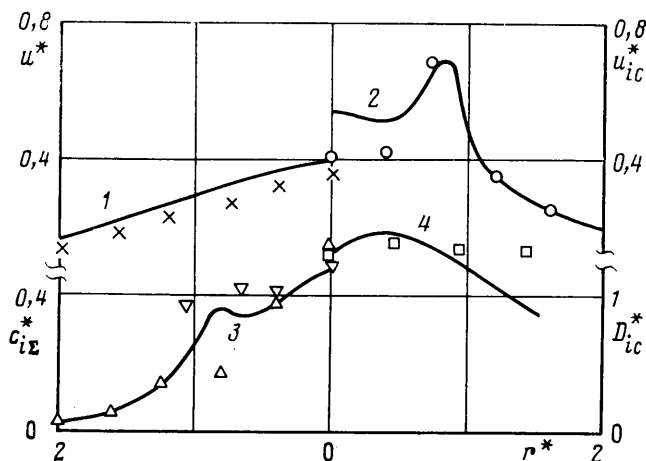
Для расчета двухфазной полидисперсной струи необходимо знать скорости всех классов капель. Экспериментально эта информация может быть получена либо с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости, либо с помощью голографии. Но лазерный доплеровский измеритель скорости применительно к полидисперсным двухфазным течениям в настоящее время только разрабатывается, а голография при имеющемся в потоке значении концентрации дискретной фазы не позволила получить необходимую информацию о скоростях капель. Поэтому в эксперименте с помощью газодинамического метода измерялась средняя по количеству движения скорость капель  $u_{ic}$  и принималось, что скорости всех классов капель равны этой скорости. Поле скорости капель  $u_{ic}^*$  в начальном сечении струи показано на втором графике фиг. 3. Абсолютное значение скорости капель на оси струи равно 47 м/с. Сплошной кривой изображено поле скорости капель, использовавшееся в расчете.

На третьем графике фиг. 3 представлено измеренное экспериментально с помощью метода интегрирующей диафрагмы (точки 1) и газодинами-

ческого метода (точки 2) изменение суммарной объемной концентрации капель  $c_{i\Sigma}^*$  в начальном сечении струи. Абсолютное значение объемной концентрации капель на оси струи равно  $0,67 \cdot 10^{-3}$ . Сплошной кривой показано изменение суммарной объемной концентрации капель, рассчитанное по кривым фиг. 2.

На четвертом графике фиг. 3 точками представлены результаты измерения среднего объемно-поверхностного диаметра капель  $D_{ic}^*$  с помощью метода интегрирующей диафрагмы. Сплошной кривой показано изменение среднего диаметра капель в начальном сечении струи, рассчитанного по кривым фиг. 1. Абсолютное значение среднего объемно-поверхностного диаметра капель на оси течения равнялось 13,5 мкм.

Расчет двухфазной струи проводился в безразмерном виде. В качестве исходных данных для этого расчета были взяты поля параметров струи,



Фиг. 5

приведенные на фиг. 2–3 сплошными кривыми, которые были получены в результате обработки экспериментальных точек методом, описанным в [7].

На фиг. 4 показано изменение вдоль оси струи значений параметров струи: среднего объемно-поверхностного диаметра капель  $D_{icm}^*$  (кривая 1), средней по количеству движения скорости капель  $u_{ic}^*$  (кривая 2), скорости газа  $u_m^*$  (кривая 3), суммарной объемной концентрации капель  $c_{i\Sigma m}^*$  (кривая 4) и границы струи  $r_{1/2u}^*$ , рассчитанной по  $1/2u$ . Результаты измерений изображены точками, а результаты расчета — сплошными кривыми.

Сравнение результатов расчета и эксперимента для поперечного сечения струи, находящегося на расстоянии  $x^*=x/r_0=25$  от ее начального сечения, приведено на фиг. 5. Кривыми 1–4 изображены поля скорости газа, средней скорости, суммарной объемной концентрации и среднего диаметра капель соответственно.

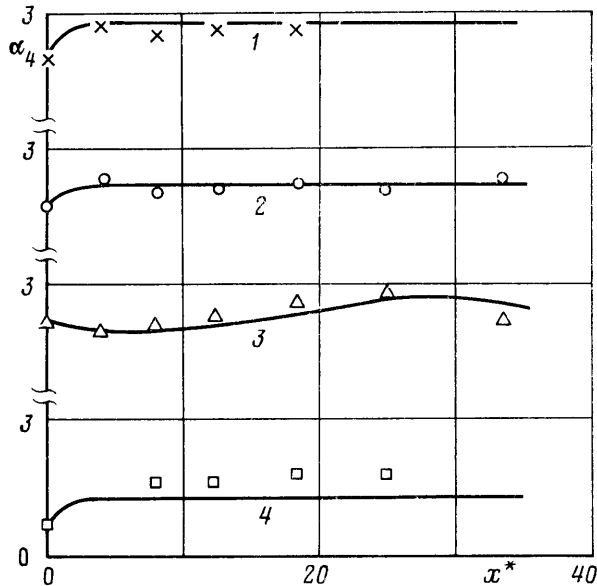
На фиг. 6 показана зависимость относительных показателей эксцесса  $\alpha_i$  полей параметров фаз двухфазной струи от координаты  $x^*$ . На этой фигуре так же, как и на других, результаты эксперимента изображены точками, а результаты расчета — сплошными кривыми. Обозначение кривых такое же, как на фиг. 5.

При вычислении относительных показателей эксцесса полей параметров дисперсной фазы части этих полей, соответствующие значению объ-

емной концентрации капле менее 1% от ее значения на оси струи, в расчет не принимались из-за малой достоверности измерений.

Из графиков фиг. 6 следует, что поля скорости газа, средней скорости и среднего диаметра капле в данном случае подобны, начиная с  $x^* = 5$ . Поля суммарной объемной концентрации капле на рассматриваемом участке струи, строго говоря, не подобны.

Информация, представленная на фиг. 4–6, позволяет сделать вывод об удовлетворительном согласовании результатов теоретического расчета



Фиг. 6

полидисперсной двухфазной струи, выполненного по математической модели [1], с результатами экспериментального исследования, что является подтверждением того, что эта модель верно отражает процессы, протекающие в двухфазных полидисперсных струйных течениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А. Математическая модель двухфазной турбулентной струи.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 6, с. 69–77.
2. Абрамович Г. Н. О влиянии примеси твердых частиц или капле на структуру турбулентной газовой струи.— Докл. АН СССР, 1970, т. 190, № 5, с. 1052–1055.
3. Дигякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 207 с.
4. Лепешинский И. А., Зуев Ю. В., Бажанов В. И. Зондовый метод измерения параметров фаз двухфазного двухкомпонентного потока.— В кн.: Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Межвуз. темат. сб. науч. тр. Вып. 1. Харьков, 1978, с. 123–128.
5. Шифрин К. С. Оптические исследования облачных частиц.— В кн.: Исследование облаков, осадков и грозového электричества. М.: Гидрометеоиздат, 1957, с. 19–24.
6. Шифрин К. С., Колмаков И. Б. Влияние ограничения интервала измерения индикатрисы на точность метода малых углов.— Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1966, т. 2, № 8, с. 851–858.
7. Ерганова О. Н., Скимунг В. К. О восстановлении функции и ее производных.— В кн.: Аэродинамика, динамика полета и системы управления. Межвуз. сб. науч. ст. Вып. 1. Куйбышев, 1972, с. 81–90.

Москва

Поступила в редакцию  
12.XI.1985