

## СОВМЕСТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНЫХ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИМИ И ЗОНДОВЫМИ МЕТОДАМИ

Лепешинский И.А.<sup>\*</sup>, Ципенко А.В.<sup>\*\*</sup>, Решетников В.А.<sup>\*\*\*</sup>,  
Кучеров Н.А.<sup>\*\*\*\*</sup>, Ся Сюй<sup>\*\*\*\*\*</sup>

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия*

<sup>\*</sup> e-mail: igorlepeh@yandex.ru

<sup>\*\*</sup> e-mail: tsipenko\_av@mail.ru

<sup>\*\*\*</sup> e-mail: vresh031152@mail.ru

<sup>\*\*\*\*</sup> e-mail: n.kutcherov@bk.ru

<sup>\*\*\*\*\*</sup> e-mail: 272276952@qq.com

Статья поступила в редакцию 14.05.2019

Рассматривается способ измерения параметров двухфазного высококонцентрированного газочапельного потока, основанный на совместном использовании лазерно-оптических и зондовых методов измерения. Проанализированы причины погрешностей зондового метода измерения и предложены устройства их устранения. Впервые предложена методика определения коэффициента упругости удара, что позволило экспериментально определять локальные значения полей массовых расходов, концентраций, скоростей фаз и размеров капель, в частности при исследовании многофорсуночного смесителя камеры сгорания.

*Ключевые слова:* двухфазный газочапельный поток, зондовые методы, скорости, расходы фаз, размеры капель, лазерно-оптические методы, коэффициент упругости удара, исследование двухфазной форсунки камеры сгорания воздушно-реактивного двигателя.

При экспериментальном изучении двухфазных течений часто возникает необходимость в измерении локальных значений параметров фаз. Эти параметры могут быть измерены как лазерно-оптическими, так и зондовыми методами. Лазерно-оптические методы ранее не позволяли исследовать течения с большой концентрацией дисперсной фазы, а также определять параметры газовой фазы в двухфазном потоке.

Зондовые методы давно используются для измерения параметров двухфазного потока [1–5, 8, 9, 16, 17], они относятся к тем немногочисленным методам, с помощью которых можно измерить локальные расходы фаз. Однако при их применении возникает ряд проблем: это проблема изокINETИЧНОСТИ при отборе пробы и значение коэффициента упругости удара. Используя некоторые конструктивные усовершенствования и применяя зондовый метод в комбинации с PIV-методом [11], можно решить эти проблемы и определить все па-

раметры двухфазного потока при высоких концентрациях.

Рассмотрим принципиальную схему зондового метода, показанную на рис. 1 [2].

В поток вводится цилиндрический зонд с входным отверстием  $d_H$ . При определении расходов и концентрации фаз зонд соединяется с системой отсоса (позиция  $a$ ) и работает в режиме изокINETИЧЕСКОГО отбора, при котором статическое давление внутри зонда (на рисунке  $p_H$ ) поддерживается равным статическому давлению в рабочей камере или окружающей среде. В этом случае при отборе не происходит деформации линий тока. Отобранная проба разделяется с помощью сепаратора на фазы. Измерив расход каждой фазы, можно найти расходную массовую концентрацию фаз:

$$\psi = \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{г}}}. \quad (1)$$

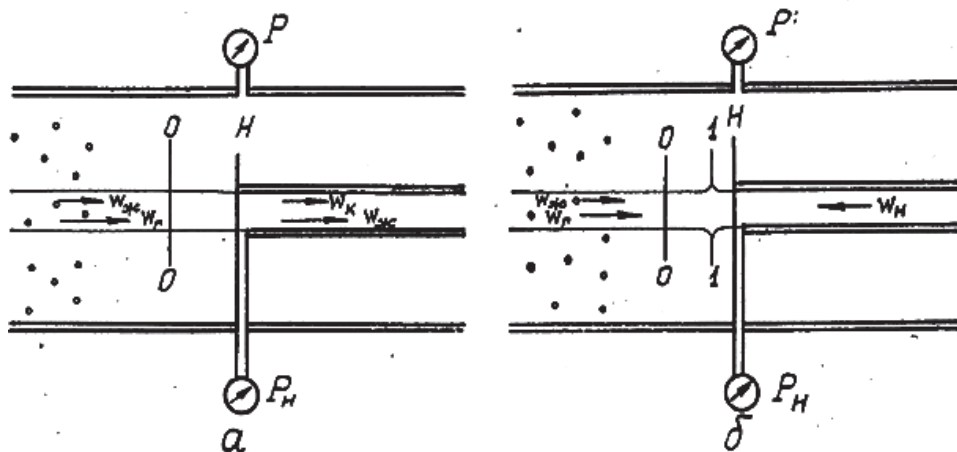


Рис. 1. Принципиальная схема работы зондового метода

При измерении давления торможения смеси  $p^*$  канал для отбора фаз перекрывается, и зонд работает в режиме трубки Пито. Формула для расчета  $p^*$  имеет вид

$$p^* = p + \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2 (1 - \alpha_k)}{2} + K_y \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}}^2 \alpha_{\text{ж}}}{2}. \quad (2)$$

Здесь  $K_y$  — коэффициент упругости удара [10], который изменяется в диапазоне от 1 до 2. Будем полагать, что при  $K_y = 1$  удар упругий, при  $K_y = 2$  — неупругий.

Добавим:

уравнения расходов фаз

$$G_{\Gamma} = \alpha_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma} \cdot S; \quad (3)$$

$$G_{\text{ж}} = \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot w_{\text{ж}} \cdot S; \quad (4)$$

уравнение состояния газа

$$\rho_{\Gamma} = \frac{p_{\Gamma}}{R \cdot T_{\Gamma}}; \quad (5)$$

уравнение объемных концентраций

$$\alpha_{\Gamma} + \alpha_{\text{ж}} = 1. \quad (6)$$

Здесь  $w_{\Gamma}$  — скорость газа;  $w_{\text{ж}}$  — скорость капель;  $\alpha_{\Gamma}$  — объемная концентрация газа;  $\alpha_{\text{ж}}$  — объемная концентрация жидкости (капель);  $\rho_{\Gamma}$  — плотность газа;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости.

Измеряя температуру жидкости  $T_{\text{ж}}$  и полагая  $T_{\text{ж}} = T_{\text{к}} = T_{\Gamma}$ , получаем значение одной из переменных, участвующих в модели. Если измерить полное давление двухфазного потока и массовые расходы фаз, получим систему из пяти уравнений, содержащую шесть неизвестных:

$$\alpha_{\Gamma}, \alpha_{\text{ж}}, w_{\Gamma}, w_{\text{ж}}, \rho_{\Gamma}, K_y.$$

Если параметры потока определены в двух соседних точках, имеется возможность определения среднемассового размера капли на основе уравнения движения капли относительно газа:

$$M_{\text{к}} \frac{dw_{\text{ж}}}{dt} = C_x \frac{\rho_{\Gamma} \cdot (w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}) |w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}|}{2} f_{\text{к}}. \quad (7)$$

Здесь  $M_{\text{к}}$  — масса капли,

$$M_{\text{к}} = \rho_{\text{ж}} \frac{\pi D_{\text{к}}^2}{4}, \quad (8)$$

где  $D_{\text{к}}$  — диаметр капли;

$f_{\text{к}}$  — площадь поперечного сечения капли;

$C_x$  — коэффициент сопротивления капли, рассчитанный по одной из эмпирических формул в зависимости от числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot |w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}| \cdot D_{\text{к}}}{\mu_{\Gamma}} \quad (9)$$

и условий обтекания капли (капля принята сферической).

Запишем выражение (7) применительно к двум сечениям потока, расположенным друг от друга на расстоянии  $\Delta z$ :

$$M_{\text{к}} \frac{dw_{\text{ж}}}{dt} = C_x \frac{\rho_{\Gamma} \cdot (w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}) |w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}|}{2} f_{\text{к}}. \quad (10)$$

Полагая капли сферическими, из (10) можно определить их диаметр:

$$D_{\text{к}} = 0,75 C_x \frac{\rho_{\Gamma} (w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}) |w_{\Gamma} - w_{\text{ж}}| \Delta z}{\rho_{\text{ж}} \cdot \Delta w_{\text{ж}} \cdot w_{\Gamma}}. \quad (11)$$

Таким образом, проведя все зондовые измерения в двух точках потока, расположенных на расстоянии  $\Delta z = 1 \div 6$  мм, и воспользовавшись уравнением (11), можно получить средний размер капель потока. На рис. 2 приведены результаты определения параметров двухфазного потока газокпельного воздушно-водяного потока  $\alpha_r, \alpha_k, w_r, w_k, \rho_r$  на выходе из сужающегося сопла [3].

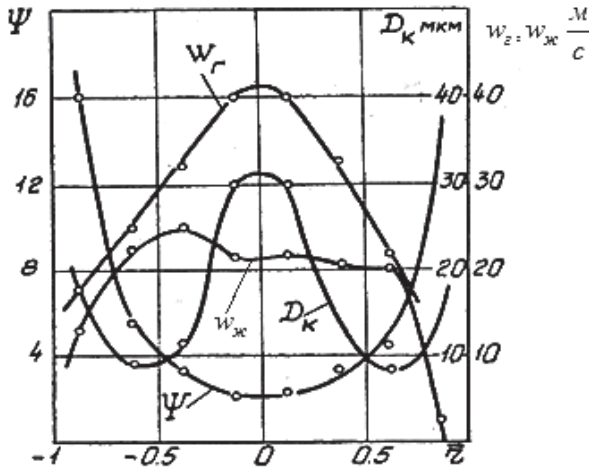


Рис. 2. График измеренных параметров двухфазного потока на выходе из сопла по радиусу  $r$  [3]

На рис. 2  $\psi = G_{ж}/G_r$  — локальное значение концентрации. Следует отметить, что расчет соответствует случаю абсолютно неупругого удара капель,  $K_y = 2$ . Это справедливо при сравнительно малых скоростях и размерах капель дисперсной фазы и если измерение полного давления производится по схеме рис. 1,б. С ростом скорости и размеров капель следует вводить в решение поправку, связанную с коэффициентом упругости удара. Вместе с тем, при использовании зондового метода существует еще ряд проблем.

Прежде всего — изокINETИЧНОСТЬ отбора пробы [6, 9, 13—15, 19]. Это условие должно обеспечить неизменность линий тока двухфазного потока (в частности газа) на режиме отбора пробы. При этом статическое давление, измеряемое на входе, должно равняться давлению во внешнем потоке. Точно измерить статическое давление на входе в зонд, как правило, трудно. Несоблюдение изокINETИЧНОСТИ приводит к погрешности в определении расхода газа, занижению скорости газа и завышению скорости капель [6]. При изменении противодавления в зонде до  $\pm 0,1$  атм возникает погрешность в определении скорости газа до 10—20%, причем меньшая величина относится к случаю разрежения в зонде. А погрешность в определении скорости капель изменялась от 2 до 4%

при концентрации капель, равной 5, и до 40% — при концентрации, равной 1.

Как всякий косвенный метод, изокINETИЧЕСКИЙ зонд нуждается в проверке каким-либо другим известным способом. Поэтому для оценки работы зондового метода параметры, измеренные зондом, сравнивались с результатами, основанными на измерении силы тяги сопла  $X$  и расходов фаз  $G_{ж}$  и  $G_r$  [5]:

$$X = (P_0 - B_0)s + \frac{1}{s} \int_0^s (G_{ж} w_{ж} + G_r w_r) ds. \quad (12)$$

Тяга  $X$  сопла измерялась тягомером. Значения массовых расходов определялись интегрированием по сечению результатов отбора проб по формулам (11) и (12), где

$$G_r = \frac{1}{s} \int_0^s G_r ds; \quad (13)$$

$$G_{ж} = \frac{1}{s} \int_0^s G_{ж} ds. \quad (14)$$

Результаты приведены на рис. 3.

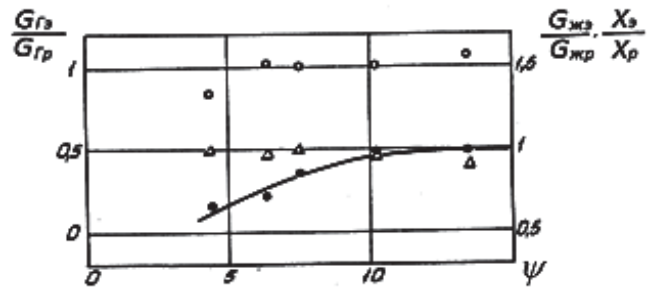


Рис. 3. Зависимость отношения измеренных параметров к рассчитанным по формулам (12)—(14):  
 $\circ - G_{жэ}/G_{жр}; \triangle - G_{rэ}/G_{rр}; \bullet - X_э/X_p$  [5]

До образования двухфазного потока расходы каждой фазы измерялись расходомерами. На графике видно хорошее совпадение расходов в широком диапазоне концентраций. Кроме этого, сравнивались значения скоростей фаз, определенных с помощью зонда и с использованием измерения силы тяги, и получена зависимость погрешности в определении скоростей фаз. Результаты показаны на рис. 4 и 5, где  $w_{гн}$  и  $w_{кн}$  — скорости, определенные с помощью зонда;  $w_{гт}$  и  $w_{кт}$  — скорости, определенные с помощью тягомера. Данные рис. 4 в целом свидетельствуют об удовлетворительном согласовании результатов в исследованном диапазоне концентраций. Вместе с тем,

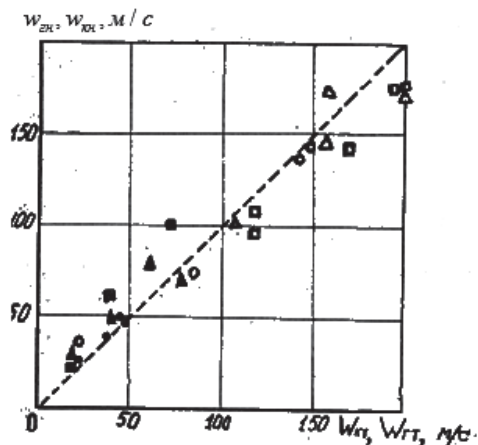


Рис. 4. Сравнительная оценка измерения скоростей фаз с помощью зонда и по тяге [5]

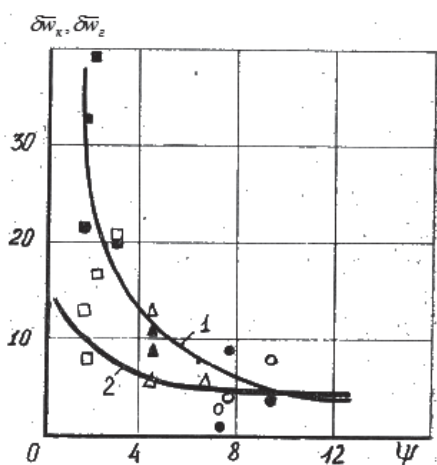


Рис. 5. Относительная погрешность в определении скоростей фаз зондовым методом [5]

видно, что данные по скорости газа несколько завышены, а скорости капель несколько занижены. Это связано с тем, что действительное значение  $K_y$  не равно принятому значению 2. Для более точного определения параметров двухфазного потока необходимо знать действительное значение  $K_y$ .

На рис. 5 приведены данные о зависимости относительных погрешностей  $\delta w_k$  и  $\delta w_r$  от концентрации  $\psi$ . В области малых концентраций увеличиваются погрешности, связанные с определением всех параметров. Для использования зонда в этой области необходимо провести дополнительные исследования.

Проблему влияния неизокинетичности можно решить, используя конструкцию зонда [11], показанную на рис. 6. Такая конструкция позволяет осуществлять изокинетический отбор пробы и одновременно измерять давление торможения. На рис. 7 и 8 показаны расчеты обтекания зонда, имеющего конический вход [11]. Осесимметрич-

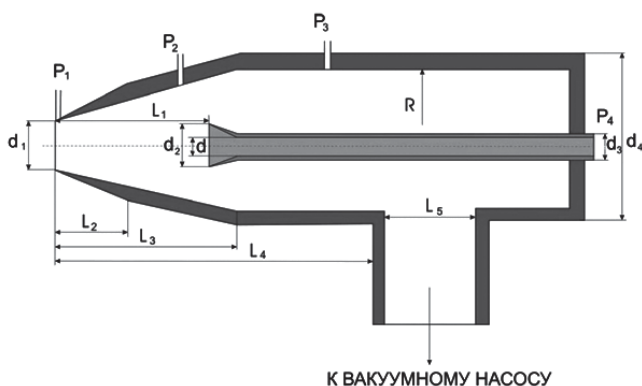


Рис. 6. Конструкция изокинетического зонда [11]

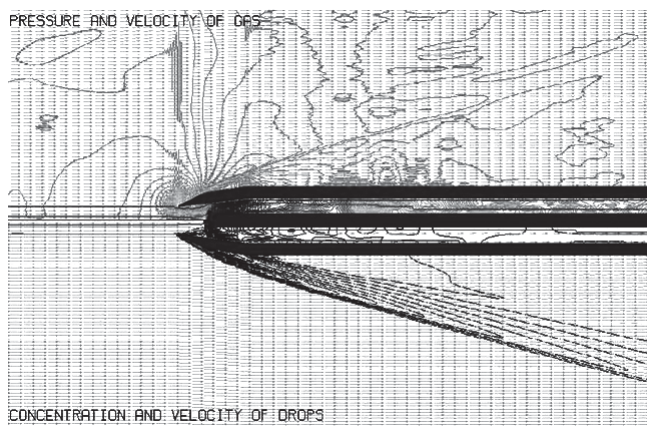


Рис. 7. Численное моделирование работы зонда для одновременного измерения расходов фаз и полного давления газочапельного потока [11]

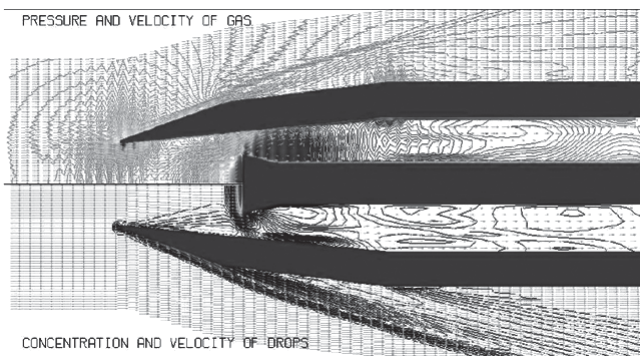


Рис. 8. Увеличенное изображение носика зонда с рис. 7 [11]

ный поток течет слева направо. Горизонтальные линии у оси симметрии перед носиком зонда — линии постоянного расхода жидкости — свидетельствуют, что условие изокинетичности будет соблюдаться. То есть от измерения статического давления на входе ( $p_1$  на рис. 6) можно отказаться.

Внутри зонда также имеется устройство для измерения полного давления. Следует отметить, что диаметр  $d_2$  трубки отбора давления меньше диаметра  $d_1$  входного отверстия для отбора про-

бы. Это означает, что будет определенная погрешность в измерении полного давления, которая может быть учтена. Область торможения, выделенная черным цветом, существенно меньше, чем размер входного отверстия.

В верхней части рисунка — изолинии давления и векторы скорости газа, в нижней — изолинии объемной доли и векторы скорости капель. Вместе с тем ситуация с измерением полного давления гораздо сложнее.

На рис. 9 и 10 представлены результаты работы [12] по численному исследованию процессов, протекающих внутри зонда при обтекании его двухфазным газок капельным потоком.

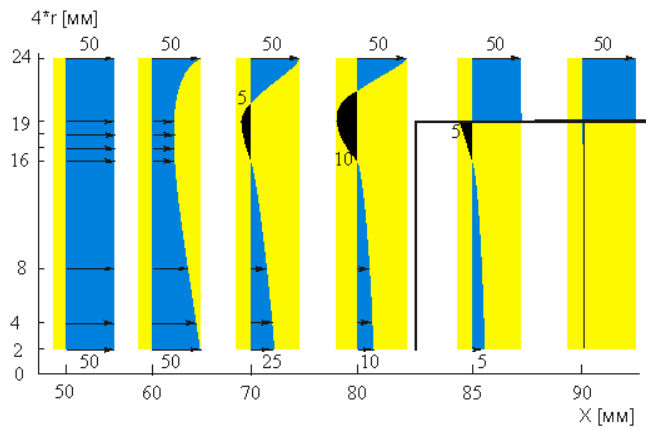


Рис. 9. Распределения осевой скорости капель (жидкости) по длине канала и по радиусу (область зонда выделена черной сплошной линией). Цифрами внутри графика показаны значения скорости в м/с (с 80 мм — осевая скорость частиц внутри частично проницаемого тела) [12]

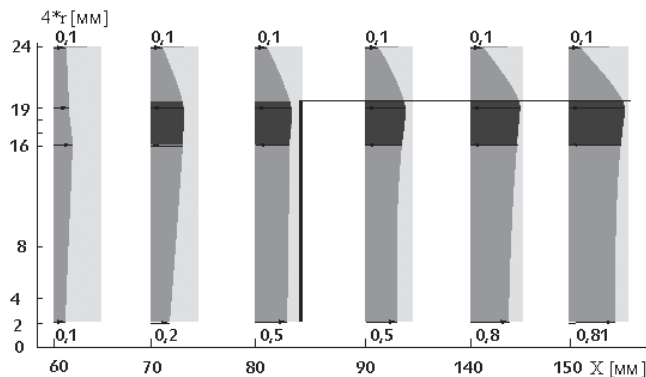


Рис. 10. Распределения объемной концентрации по длине канала и по радиусу. Во внутренней части графика приведены значения объемной концентрации жидкости  $\alpha_k$  [12]

На рис. 9 и 10 по оси  $Y$  отложено значение радиуса, умноженное на 4, и показаны поля параметров в набегающем потоке и внутри зонда в режиме измерения полного давления (при пере-

крытом отборе пробы). В частности, поля внутри зонда начинаются с абсциссы 80 мм и выделены черной сплошной линией. Это поля скорости капель (жидкости), рис. 9, и объемной концентрации  $\alpha_k$ , рис. 10, причем зонд рассматривался как частично проницаемое тело. Расчеты показали, что двухфазный поток проникает внутрь зонда и затем возвращается навстречу набегающему потоку, т.е. внутри зонда существует циркуляционное течение. На рисунках поток, входящий в зонд, показан в нижней части диаграмм, а возвратное течение — в верхней. Приведены также значения соответствующих параметров. Граничные условия на входе: скорости газа и капель 50 м/с, температуры фаз 288 К, давление  $1,005 \cdot 10^5$  Па, диаметр капель 50 мкм.

Из рис. 10 следует, что внутри зонда структура двухфазного потока изменяется с газок капельной ( $\alpha_k = 0.1$ ) на пузырьковую ( $\alpha_k = 0,81$ ).

Коэффициент упругости удара зависит от многих параметров двухфазного потока: размера капель, концентрации, скоростей фаз, давления, длины торможения потока в зонде и др. Задачу о коэффициенте  $K_y$  можно решить с помощью лазерно-оптического PIV-метода [14], который позволяет независимо определять скорость капель  $w_k$  и, таким образом, замкнуть систему пяти уравнений (2)–(6) с шестью неизвестными. Возможность регистрации скоростей капель системой PIV связана с высоким временным и пространственным разрешением системы. В [14] исследовалось течение двухфазного потока на выходе из струйного насоса (эжектора) с двухфазным рабочим телом. Эжектор служит для отсасывания воздуха. Использовались зонд с коническим входом и лазерная система PIV для измерения скорости капель. На рис. 11 и 12 приведены полученные результа-

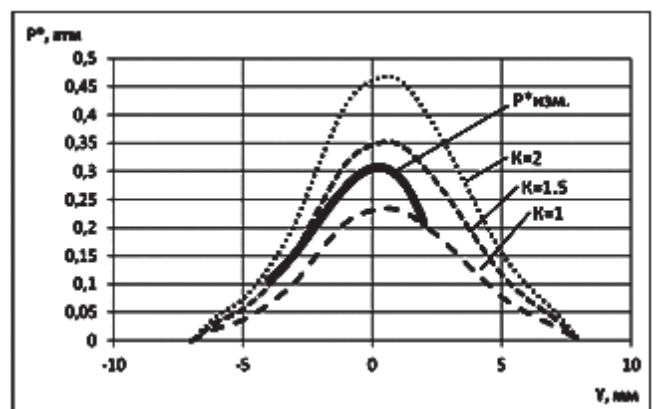


Рис. 11. Вертикальное поле полного давления  $p_n^*$  при коэффициенте эжекции  $\Psi = 47.6$  ( $g_{г,эж} = 4.22$  г/с) [14]

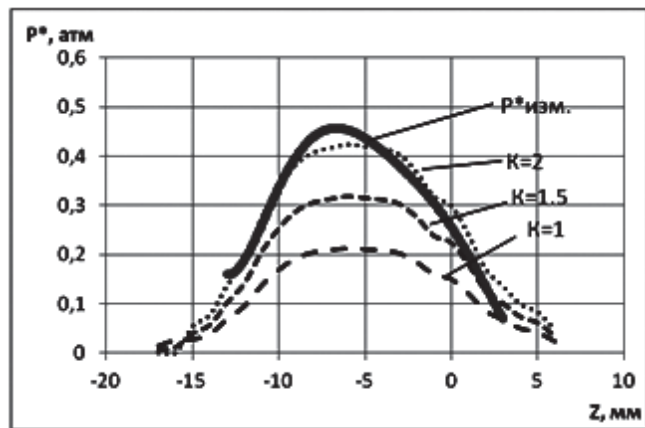


Рис. 12. Горизонтальное поле полного давления  $p_n^*$  при нулевом расходе газа ( $g_{г.эж} = 0$  г/с) [14]

ты, показывающие изменение полного давления в одном из поперечных сечений. При этом на графики нанесены линии постоянных значений  $K_y$ . Поскольку графики получены при существенно разных значениях средней концентрации, можно констатировать, что полученный результат соответствует физике процесса. График  $p^*$  (рис. 12) соответствует минимальному количеству газовой фазы в потоке (хотя вход отсоса закрыт, воздух эжектируется извне). Он показывает, что измеренные значения  $p^*$  близки к рассчитанным для  $K_y = 2$ , что соответствует неупругому удару. Наличие существенного количества воздуха в потоке, т.е. снижение концентрации жидкости (рис. 11), снижает значение  $K_y$  от величины, близкой к двум (рис. 12), в направлении значений упругого удара.

Таким образом, предложенный способ совместного использования двух методов измерения позволил впервые получить информацию о коэффициенте упругости удара, который дает возможность однозначно судить о реальных значениях параметров двухфазного газочапельного высококонцентрированного потока и при этом, естественно, повысить точность определения всех параметров. Полученные результаты были использованы для исследования многофорсуночного смесителя камеры сгорания, показанного на рис. 13.

Смеситель работает на двухфазном газожидкостном рабочем теле (воздуха и воды), которое, вытекая из форсунок, формирует газочапельный поток. Размеры капель и их скорости измеряют-



Рис. 13. Многофорсуночный смеситель камеры сгорания

ся лазерно-оптическими методами [14], а измерение параметров газовой фазы возможно на основе полученных выше результатов зондовыми методами. На рис. 14 показаны поля газовой фазы: приведенного расхода и скоростей. Приведенный расход представляет собой отношение расхода через форсунку к суммарному расходу газовой фазы, который измерялся тепловым расходомером отдельно при формировании двухфазного потока. График показывает удовлетворительное качественное совпадение кривых расхода и скоростей газа.

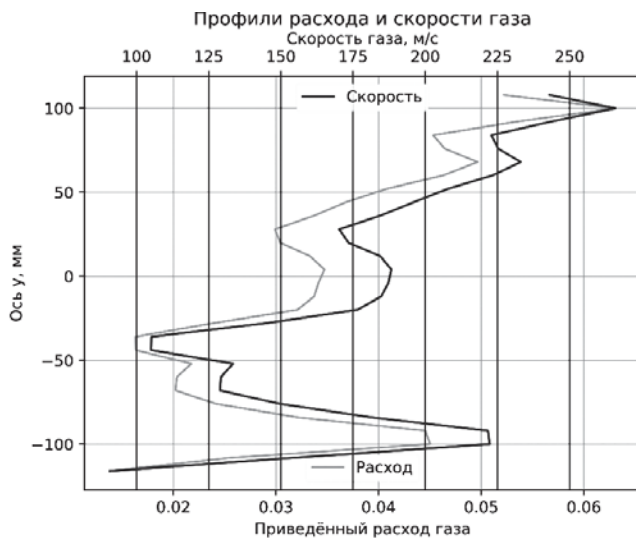


Рис. 14. Профили расхода и скорости газовой фазы

## Выводы

Предложенная методика совместного использования зондовых и лазерно-оптических методов измерения и конструктивных изменений зонда позволила впервые измерить все необходимые параметры двухфазного высококонцентрированного двухфазного газочапельного потока и повысить точность их измерения. Впервые определен коэффициент упругости удара капли, что позволило измерить параметры газовой фазы двухфазного высококонцентрированного потока: скорости и расход.

## Библиографический список

1. Мокеев Ю.Г. Экспериментальное исследование моделей газожидкостного реактивного движителя с форсированием тяги путем балластирования // Гидромеханика. 1973. Вып. 24. С. 73-77.
2. Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Царенко П.Б. Зондовый метод измерения параметров двухфазного высококонцентрированного потока // Струйные, отрывные и нестационарные течения: Сб. тезисов XXI Всероссийского семинара (Новосибирск, 11-13

- ноября 2015). Новосибирск: Изд-во Параллель, 2007. С. 128-130.
3. *Лепешинский И.А., Зуев Ю.В., Бажанов В.И.* Зондовый метод измерения параметров фаз двухфазного двухкомпонентного потока // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков: ХАИ, 1978. Вып. 1. С. 123-128.
  4. *Васильев Ю.В., Гальбек А.А., Китанин Э.Л.* Применение трубчатых зондов при исследовании гидродинамики газожидкостных потоков // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков: ХАИ, 1978. Вып. 1. С. 117-125.
  5. *Бузов А.А.* Некоторые результаты экспериментального исследования изокINETического зонда для замера скоростей фаз и концентрации в двухфазном потоке // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 5. С. 1117.
  6. *Бажанов В.И., Лепешинский И.А.* Оценка работы зондового метода измерения параметров фаз двухфазного потока // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков: ХАИ, 1984. Вып. 6. С. 80-89.
  7. *Бузов А.А., Дудченко С.Г., Лепешинский И.А.* Исследование работы изокINETического зонда для замера параметров двухфазного дисперсного потока // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков: ХАИ, 1979. Вып. 2. С. 157-159.
  8. *Пчелкин И.М., Калакуцкая Н.А., Парфентьева И.Ф.* Исследование локальных характеристик двухфазного потока на срезе сопла // Исследование по механике и теплообмену двухфазных сред: Сб. трудов. М.: М-во энергетики и электрификации СССР. Главниипроект. Энерг. ин-т им. Г.М. Кржижановского, 1974. Вып. 25. С. 63-78.
  9. *Петухов И.И., Фролов С.Д.* Об измерении локальных параметров пузырькового газожидкостного потока трубчатыми зондами // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. Харьков: ХАИ, 1980. Вып. 3. С. 121-126.
  10. *Савельев И.В.* Курс физики: В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика: Учебное пособие. — М.: Наука, 1989. — 352 с.
  11. *Ципенко А.В.* Теория и методы повышения эффективности противопожарных систем на воздушном транспорте: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: НИИ НТ МАИ, 2006. — 354 с.
  12. *Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Царенко П.Б.* Численная модель зонда для измерения параметров двухфазного потока // Высокие технологии — 2004: Тезисы докладов. М.: МЭИ, 2004. С. 60-61.
  13. *Лепешинский И.А., Зуев Ю.В., Царенко П.Б.* Исследование взаимодействия дозвукового высококонцентрированного двухфазного потока с частично проницаемым телом // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 3. С. 55-62.
  14. *Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А.* Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т.16. №2. С. 492-494.
  15. *Tsipenko A.V.* The dispersion of gas-droplet flow with a large fraction of liquid at the outlet from a long nozzle // High Temperature. 2006. Vol. 44. No. 2, pp. 243-252.
  16. *Hewitt G.F.* Measurement of Two Phase Flow Parameters. — Academic Press, 1978. — 287 p.
  17. *Anderson G.H., Mantzourania D.G.* Two-phase (gas-liquid) flow phenomena-11. Liquid entrainment // Chemical Engineering Science. 1960. Vol. 12. No. 4, pp. 233-242.
  18. *Wilcox J.D.* Isokinetic Flow and Sampling // Journal of the Air Pollution Control Association. 1956. Vol. 5. No. 4, pp. 226-245. DOI: 10.1080/00966665.1956.10467715
  19. *Sovani S.D., Sojka P E., Sivathanu Y.R.* Predictions of Drop Size Distributions from First Principles: Joint PDF Effects // Atomization Sprays. 2000. Vol. 10. No. 6, pp. 587-602.
  20. *Kim H.G., Yano T., Song K.K., Shuichi T.* Microscopic Spray Characteristics in the Effervescent Atomizer with Two Aerator Tubes // KSME International Journal. 2004. Vol. 18. No. 9, pp. 1661-1667. DOI: 10.1007/BF02990381

## JOINT MEASUREMENT OF GAS-DYNAMIC PARAMETERS OF TWO-PHASE HIGHLY CONCENTRATED FLOWS BY LASER-OPTICAL AND PROBE METHODS

Lepeshinskii I.A.\* , Tsipenko A.V.\*\* , Reshetnikov V.A.\*\*\* , Kucherov N.A.\*\*\*\* , Sya Syui\*\*\*\*\*

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

\* e-mail: igorlepeh@yandex.ru

\*\* e-mail: tsipenko\_av@mail.ru

\*\*\* e-mail: vresh031152@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: n.kutcherov@bk.ru

\*\*\*\*\* e-mail: 272276952@qq.com

### Abstract

The article considers the problems of joint application of the laser-optical technique for measuring parameters of the two-phase highly concentrated gas-drop flow. Each technique does not allow measuring all necessary parameters. The probe method allows adequate measuring of the local values of the phase flow rates and determine concentration, while measuring phase velocities and drops dispersivity requires suggestion of various hypotheses, requiring experimental verification.

Laser methods allow measure the drops velocities and their sizes in the two-phase flow. However, earlier they could not be applied for studying the flows with large concentration of dispersed phase, as well as determining the gas phase parameters in the two-phase flow. The laser engineering evolution resulted in developing lasers with high spatial and temporal definition, allowing their operation in the area of high concentration of the condensed phase. Combining these two techniques for the two-phase flow study allows go ahead in the area of measuring the parameters, which were either impossible to be measured, or determined with significant error. Particularly, to measure the gas phase velocity and improve measurement accuracy.

Laser-optical methods and Probe methods have long been employed to measure two-phase flow parameters. They are the ones of the few, by which local phase flow rate can be measured. However, their application arouses a number of problems. This is isokinetic problem while sampling and the impact elasticity coefficient selection. Certain design improvements and the probe technique application in compilation with PIV-method allows solving these problems and determining all parameters of the two-phase flow at high concentrations.

The probe represents a cylindrical channel employed in two modes: sampling and measuring the

stagnation pressure of a two-phase flow. The problem of isokinetic sampling and selecting the elastic coefficients values of the impact of drops, determining the kinetic energy transfer in the two-phase flow during its braking (the stagnation pressure measurement), were analyzed. To ensure isokineticity, a structural solution was proposed for the probe, which ensures significant error reduction. Application of laser with high temporal and spatial resolution for measuring (PIV-system) allowed determine the drops velocity in a highly concentrated two-phase flow, and, based on the joint measurement with a probe, the coefficient of impact elasticity. The proposed techniques allowed measuring for the first time all the necessary parameters of the two-phase flow. Particularly, we managed to measure the gas phase velocities, and to perform a qualitative comparison with the flow rate of the gas phase at the two-phase flow outlet from the nozzles of the engine combustion chamber mixer.

**Keywords:** two-phase gas-drop flow, probe methods, velocities, phase flow, droplet size, laser-optical methods, impact elasticity coefficient, study of the two-phase nozzle of the of epy air-breathing engine combustion chamber.

### References

1. Mokeev Yu.G. *Gidromekhanika*, 1973, no. 24, pp. 73-77.
2. Zuev Yu.V., Lepeshinskii I.A., Tsarenko P.B. *Materialy XXI Vserossiiskogo seminara "Struinye, otryvnye i nestatsionarnye techeniya" (Novosibirsk, 11-13 November 2015). Sbornik tezisov.* Novosibirsk, Parallel, 2007, pp. 128-130.
3. Lepeshinskii I.A., Zuev Yu.V., Bazhanov V.I. *Gazotermodynamika mnogofaznykh potokov v energoustanovkakh. Sbornik statei*, Kharkov, KhAI, 1978, no. 1, pp. 123-128.



4. Vasil'ev Yu.V., Gal'nbek A.A., Kitanin E.L. *Gazotermodynamika mnogofaznykh potokov v energoustanovkakh. Sbornik statei*, Kharkov, KhAI, 1978, no. 1, pp. 117-125.
5. Buzov A.A. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1981, vol. 19, no. 5, p. 1117.
6. Bazhanov V.I., Lepeshinskii I.A. *Gazotermodynamika mnogofaznykh potokov v energoustanovkakh. Sbornik statei*, Kharkov, KhAI, 1984, no. 6, pp. 80-89.
7. Buzov A.A., Dudchenko S.G., Lepeshinskii I.A. *Gazotermodynamika mnogofaznykh potokov v energoustanovkakh. Sbornik statei*, Kharkov, KhAI, 1979, no. 2, pp. 157-159.
8. Pchelkin I.M., Kalakutskaya N.A., Parfent'eva I.F. *Issledovanie po mekhanike i teploobmenu dvukhfaznykh sred: Sbornik trudov*. Moscow, Ministerstvo energetiki i elektrifikatsii SSSR. Glavniiiproekt. Energ. in-t im. G.M. Krzhizhanovskogo, 1974, no. 25, pp. 63-78.
9. Petukhov I.I., Frolov S.D. *Gazotermodynamika mnogofaznykh potokov v energoustanovkakh. Sbornik statei*, Kharkov, KhAI, 1980, no. 3, pp. 121-126.
10. Savel'ev I.V. *Kurs fiziki. V 3 tomakh. T. 1. Mekhanika. Molekulyarnaya fizika* (Physics Course. In 3 vols. Vol. 1 "Mechanics. Molecular physics"), Moscow, Nauka, 1989, 352 p.
11. Tsipenko A.V. *Teoriya i metody povysheniya effektivnosti protivopozharnykh sistem na vozdushnom transporte* (Theory and methods of efficiency improving of the fire-fighting systems in air transport), Doctor's thesis, Moscow, NII NT MAI, 2006, 354 p.
12. Zuev Yu.V., Lepeshinskii I.A., Tsarenko P.B. *Vysokie tekhnologii – 2004. Sbornik tezisov*, Moscow, MEI, 2004, pp. 60-61.
13. Lepeshinskii I.A., Zuyev Yu.V., Tsarenko P.B. An investigation of interaction between subsonic high-concentrated two-phase flow and partially permeable body. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 55-62.
14. Lepeshinskii I.A., Reshetnikov V.A., Zarankevich I.A. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 492-494.
15. Tsipenko A.V. The dispersion of gas-droplet flow with a large fraction of liquid at the outlet from a long nozzle. *High Temperature*, 2006, vol. 44, no. 2, pp. 243-252.
16. Hewitt G.F. *Measurement of Two Phase Flow Parameters*. Academic Press, 1978, 287 p.
17. Anderson G.H., Mantzourania D.G. Two-phase (gas-liquid) flow phenomena-11. Liquid tntrateinment. *Chemical Engineering Science*, 1960, vol. 12, no. 4, pp. 233-242.
18. Wilcox J.D. Isokinetic Flow and Sampling. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1956, vol. 5, no. 4, pp. 226-245. DOI: 10.1080/00966665.1956.10467715
19. Sovani S.D., Sojka P E., Sivathanu Y.R. Predictions of Drop Size Distributions from First Principles: Joint PDF Effects. *Atomization Sprays*, 2000, vol. 10, no. 6, pp. 587-602.
20. Kim H.G., Yano T., Song K.K., Shuichi T. Microscopic Spray Characteristics in the Effervescent Atomizer with Two Aerator Tubes. *KSME International Journal*, 2004, vol. 18, no. 9, pp. 1661-1667. DOI: 10.1007/BF02990381