

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ ЗАКРЫТОГО ТИПА

© 2016

- И. А. Лепешинский** доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), igorlepehsh@yandex.ru
- В. А. Решетников** кандидат физико-математических наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), yresh031152@mail.ru
- И. А. Заранкевич** аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), zarankevich@yandex.ru
- Е. А. Истомин** кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, ОКБ «Кристалл», eistomin@inbox.ru
- И. В. Антоновский** аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), antonovskij@mail.ru
- А. А. Гузенко** аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), a_guzenko_89@mail.ru

В статье рассмотрен новый газодинамический смеситель – смеситель закрытого типа. Экспериментально исследованы структура двухфазного течения, сформированного этим смесителем, поля скоростей дисперсной фазы, размер и концентрация капель. Рассчитаны пульсационные характеристики дисперсной фазы. Смеситель обеспечивает работу системы, формирующей получение двухфазных высококонцентрированных газочапельных струй при различных расходах и давлениях рабочих тел. Установлено, что благодаря наличию воздуха в двухфазном рабочем теле жидкость разгоняется на начальном участке струи, а затем тормозится. Поток является полидисперсным: существуют участки очень малых частиц, которые оптика практически не разрешает, есть очень крупные капли. Измерение дисперсности разными методами показало близкие результаты. Экспериментально установлено, что максимальные пульсации имеются на выходе из сопла, а в двухфазной струе есть локальные минимумы.

Газодинамический смеситель, двухфазный поток, дисперсная фаза, поля скоростей, размеров и концентраций, PIV-метод, пульсационная скорость.

Цитирование: Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А., Истомин Е.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А. Экспериментальное исследование газодинамического смесителя закрытого типа // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 70-80. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-70-80

Газодинамическое смесительное устройство закрытого типа

Под газодинамическим смесительным устройством закрытого типа понимается устройство, использующее двухфазное рабочее тело, состоящее из жидкости и газа, которые предварительно смешиваются, а затем подвергаются истечению. Площадь сечения выхода таких смесителей, в отличие от смесителей открытого типа [1; 2], меньше площади сечения камеры смешения. Газодинамические устройства с двухфазным рабочим телом различаются по структуре двухфазного потока, формируемой в устройстве, и по соотношению площади выходного сечения к сечению канала смесителя. Это либо пузырьковая, либо газочапельная структура, либо смешанное течение переменной структуры. Особенности исследуемого смесителя являются высокие массовые концентрации конденсированной фазы, однако объёмные концентрации соответствуют газочапельной структуре, а не пузырьковой. При работе смесителя используется область двухфазной структуры, которая по значению объёмной концентрации газа лежит выше

критического значения $\alpha_{\text{кр.}} = 0.523$, соответствующего граничному значению между этими структурами [1]. Отметим, что в ряде случаев она может иметь более сложный характер (пенная, перемежаемая, отдельная или смешанная: пузырьковая + жидкостная +газокапельная).

Рассмотрим исследуемое смесительное устройство для формирования газокнопельной структуры [3]. Оно состоит (рис. 1) из цилиндрической камеры смешения 1, у которой на входе имеется сопло 2 для подвода жидкости и отверстия 3, расположенные перпендикулярно оси камеры, для подачи воздуха.

На выходе из камеры смешения установлено цилиндрическое сопло 4 с внутренним диаметром 3.5 мм и длиной 10 мм. Смеситель с соплом на выходе обеспечивает формирование двухфазной высококонцентрированной газокнопельной струи при различных расходах и давлениях рабочих тел.

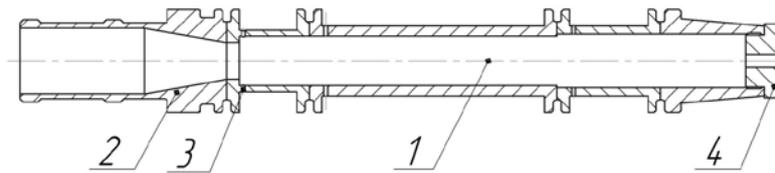


Рис. 1. Конструкция смесителя в сборе

Газодинамический стенд, предназначенный для исследования двухфазных газокнопельных и пузырьковых течений, имеет гидравлическую и пневматическую магистрали, обеспечивающие подачу жидкости (воды) и газа (воздуха), и систему измерения их параметров на входе в смеситель – давления, температуры и расходов.

Опыты показали, что исследуемый смеситель на ряде режимов отличается неустойчивой работой, поэтому приходилось специально подбирать устойчивые режимы. Такие режимы были найдены: давление жидкости и давление воздуха равны, их значения 14.4 и 8 атм.; расход жидкости при этом менялся в диапазоне 120-205 г/с для первого значения давления и 120-150 г/с для второго; расход воздуха – 6.3-8.6 г/с и 3.6-3.9 г/с соответственно; α_r варьировалось в диапазоне 0.64-0.84, что больше критического значения.

Результаты экспериментальных исследований

При проведении исследований определялась структура течения, поля скоростей дисперсной фазы, размер и концентрация капель в поле течения струи, а также пульсационные характеристики дисперсной фазы. На рис. 2 приведена фотография, полученная при использовании вспышки. На ней видна волновая пространственная структура течения. Расстояние между гребнями волны составляет в среднем 5 см.

Измерение полей скоростей. Измерение полей скоростей дисперсной фазы двухфазного потока производилась PIV-методом (Particle Image Velocimetry – измерение скоростей (анемометрия) по изображению частиц) [4]. В настоящее время наиболее часто изображение регистрируют при помощи импульсного лазерного «ножа», формирующего измерительный объём («световую плоскость» или лазерный «нож»). Световая плоскость, которую образует лазерный «нож», в экспериментах имела размер 250×250 мм и была расположена вертикально. При этом горизонтальная ось, соответствующая оси потока, имеет обозначение X, вертикальная – Y. Система может измерять скорости по оси Z, направление которой перпендикулярно «плоскости» лазерного «ножа». Толщина «плоскости» составляла 3-5 мм.

Система лазерных измерений, в основу которой положен PIV-метод, позволила по изображениям потока вычислить: линии тока и вектора скорости в пределах каждого

элементарного объёма для каждой пары импульсов лазера; карты проекций скоростей для каждой пары импульсов лазера; графики проекций скоростей U и V как функции координат X и Y . Было выполнено усреднение как по пространству, так и по времени.



Рис. 2. Фотография двухфазного потока, сформированного газодинамическим смесителем закрытого типа

На рис. 3 приведён пример фотографии начального участка струи смесителя, полученной при помощи лазерной установки, реализующей PIV-метод. По горизонтали отложена координата X , по вертикали – Y (в мм). На снимке видно, что поток полидисперсный: существуют участки очень малых частиц, которые оптика практически не разрешает, есть и очень крупные капли, выделяющиеся своей яркостью.

После регистрации изображений с помощью программного обеспечения PIV-метода, разработанного фирмой LaVision, рассчитывались поля скоростей для каждой зарегистрированной области.

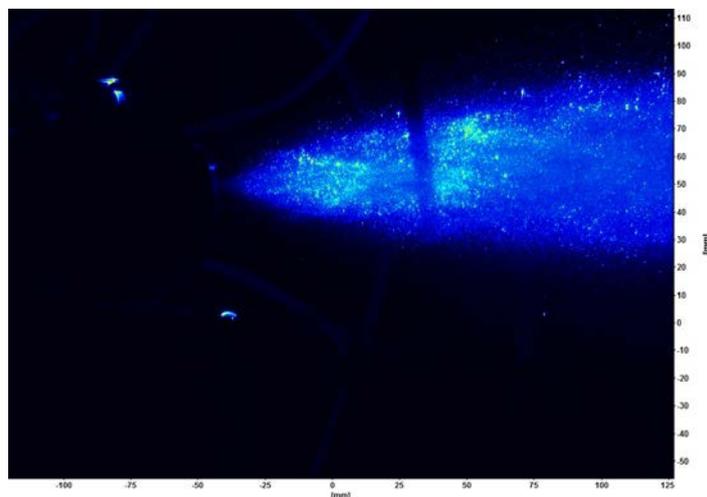


Рис. 3. Начальный участок струи: срез сопла соответствует $X = -50$ мм

Поля горизонтальной проекции скорости. На рис. 4 представлена карта мгновенных проекций горизонтальной скорости U для начального участка струи. Срез сопла находится в координате $X = -50$ мм. Скорость капель непосредственно на срезе сопла составляет 26 м/с. Карты «мгновенной» экспозиции, аналогичные приведённой на рис. 4, свидетельствуют о пульсирующем характере течения. Следует отметить, что благодаря наличию воздуха в двухфазном рабочем теле капли жидкости разгоняются

на начальном участке до скорости порядка 60 м/с (это мгновенное значение для данного снимка, среднее значение равно 70 м/с), а затем тормозятся. Для проверки достоверности результатов время между импульсами, определяющими начальное и конечное положение частиц, менялось от 3 до 20 мкс (при рекомендуемом калькулятором PIV значении 10 мкс). При этом заметных отличий в результатах измерения полей скоростей обнаружено не было.

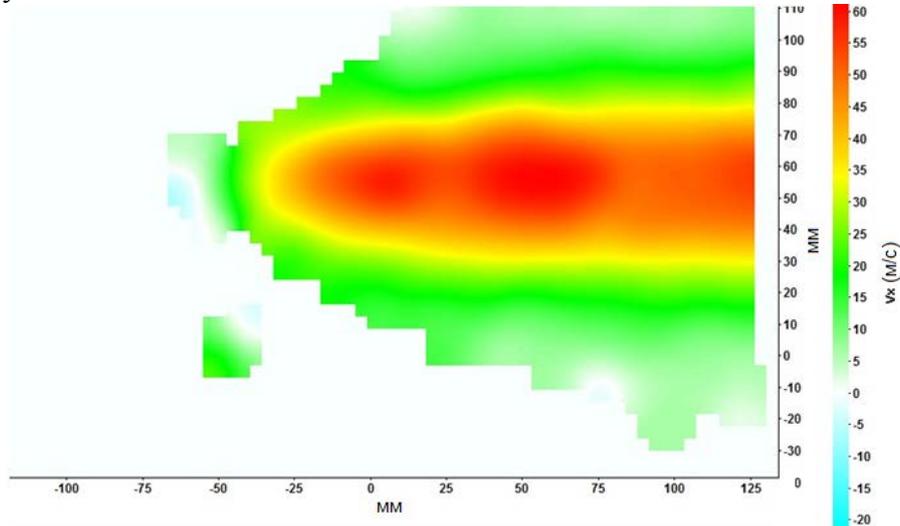


Рис. 4. Карта U : начальный участок струи; срез сопла соответствует $X = -50$ мм

Поля вертикальной проекции скорости. На рис. 5 представлена карта мгновенных проекций вертикальной скорости V для начального участка струи. Из него видно, что вертикальные составляющие, расположенные выше оси струи, направлены, в основном, вверх, а расположенные ниже оси струи, направлены вниз. Величины этих скоростей не превышают 5-6 м/с. Но существуют области вверху, где вертикальная составляющая скорости отрицательна, а внизу – положительна. При этом линия нулевых скоростей вдоль направления оси волнообразно искривлена. При дальнейшем развитии струи выше оси резко возрастает площадь областей с направлением вертикальной составляющей скорости вниз, а ниже оси – вверх. На большом расстоянии эта тенденция увеличивается, причём видны и вихревые области: на небольшой площади вертикальных скоростей есть положительные и отрицательные значения. Отметим, что на других участках течения (для них также получены карты U и V) эта тенденция сохраняется.

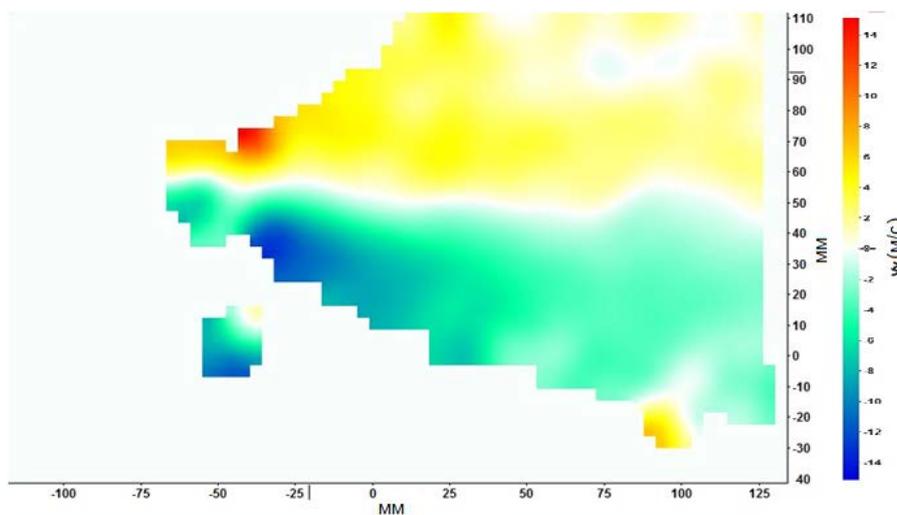


Рис. 5. Карта V : начальный участок струи; срез сопла соответствует $X = -50$ мм

Средние скорости. На рис. 6, 7 приведены графики осевой проекции вектора средней скорости капель U вдоль оси струи и в трёх поперечных сечениях струи (для расстояний 25, 300 и 550 мм от среза сопла). Следует отметить (рис. 6), что скорость капель увеличивается от 28 м/с (в начальном сечении) до максимального значения 70 м/с (на расстоянии 150 мм). Это увеличение обеспечивается воздухом, содержащимся в двухфазной смеси, который и разгоняет капли.

Максимальное значение скорости капель, рассчитанное по жидкой фазе, составляет величину порядка 50 м/с, а по средней плотности двухфазного потока – величину порядка 100 м/с.

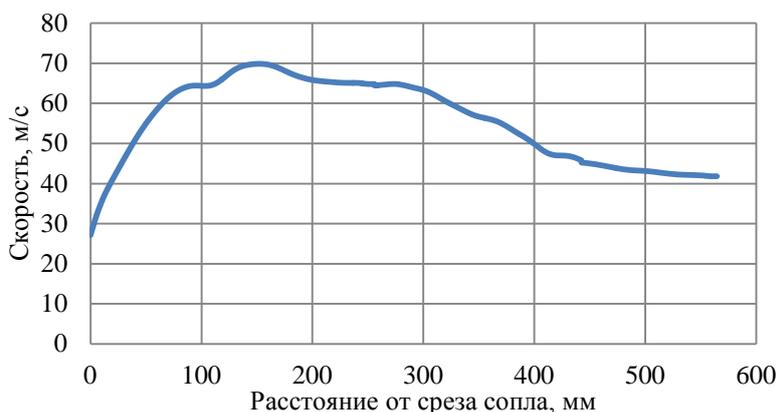


Рис. 6. Профиль U -проекции вектора скорости капель на ось X вдоль струи

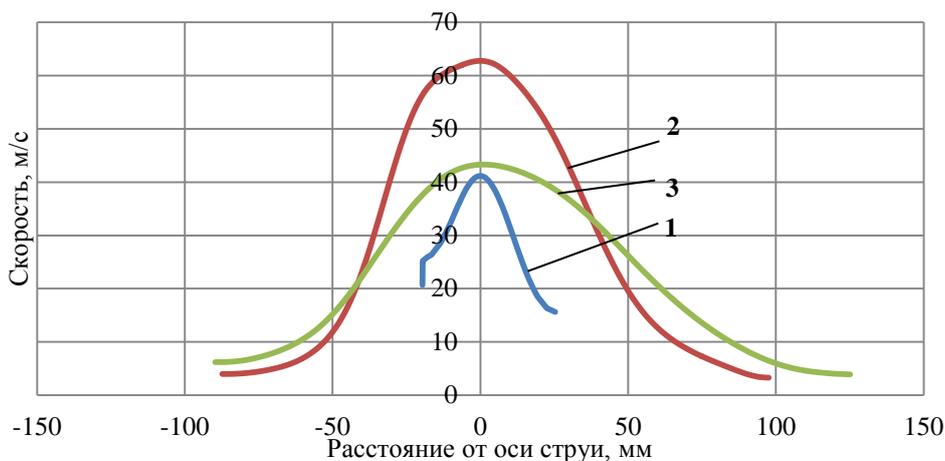


Рис. 7. Профили U -проекции вектора скорости капель на ось X в поперечных сечениях струи: 1 – 25 мм, 2 – 300 мм, 3 – 550 мм от среза сопла

Пульсационные характеристики. На рис. 8 показана относительная пульсационная скорость капель вдоль оси X :

$$\varepsilon = \frac{V'}{V}, \quad V' = \left(u'^2 + v'^2 + w'^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad V = \left(u^2 + v^2 + w^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь u, v и w – соответственно проекции средних скоростей на оси X, Y и Z ; u', v' и w' – соответственно средние пульсационные скорости вдоль осей X, Y и Z ; V – средний модуль вектора скорости капель; V' – средняя пульсационная скорость. Результаты расчётов по полученным значениям скоростей показывают, что максимальные относительные пульсации исследуемого смесителя имеют место на срезе сопла, минимум достигается на расстоянии $X=200$ мм, далее идёт медленный осциллирующий рост (рис. 8).

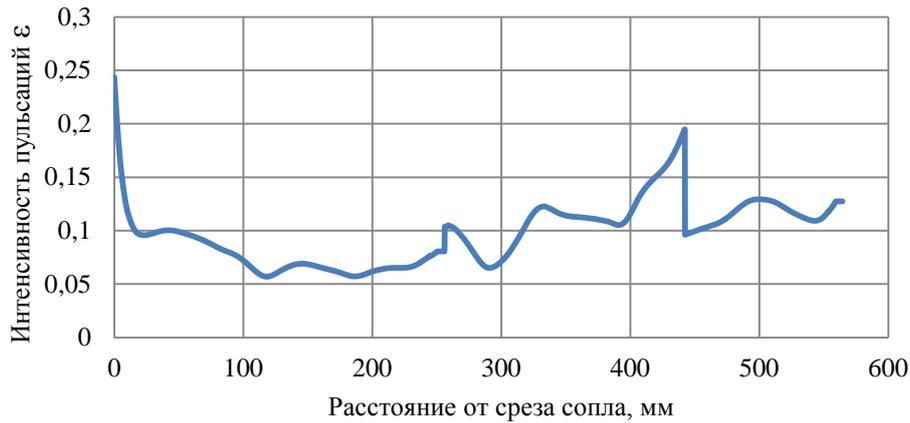


Рис. 8. Профиль относительной пульсационной скорости вдоль оси X

Измерение размеров частиц дисперсной фазы. Использовалась лазерная система измерения дисперсного состава двухфазных потоков [5; 6] в трёх сечениях, соответствующих расстояниям от среза сопла 150, 350 и 500 мм, шаг перемещения в сечении - 10 мм. Диаметр лазерного луча, зондирующего измерительный объём, составлял 2 мм. Сканирование измерительного объёма осуществлялось за счёт перемещения объекта исследования, установленного на трёхкоординатном столе. Управление перемещением осуществлялось от компьютера. В связи с тем, что число рассеивающих частиц на границе потока и в его центре сильно варьировалось, при регистрации рассеянного света проводилась многократная фотосъёмка. Диапазон выдержек – от 1/4000 до 1 с, фокусное расстояние Фурье-линзы 500 мм. Фотографирование осуществлялось в автоматическом режиме с помощью разработанного программного обеспечения. При расчёте размеров по индикатрисе рассеяния учитывалась аппаратная функция измерительной системы и вводилась поправка на многократность рассеяния.

На рис. 9 приведена зависимость диаметра Заутера от координаты Y для разных расстояний от среза сопла. Из-за нестационарности течения погрешность в измерении размеров составляла порядка 15%. Поэтому можно считать, что полученные изменения размеров находятся в пределах погрешности.

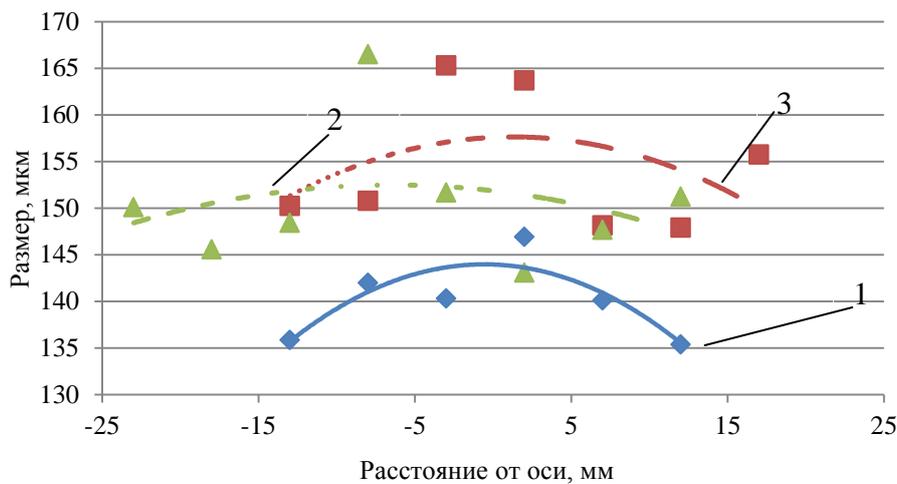


Рис. 9. Дисперсность капель (диаметр Заутера d_{32}) в трёх поперечных сечениях струи на расстояниях: 1 – 150 мм, 2 – 350 мм и 3 – 500 мм от среза сопла

Измерения размеров по изображению потока. С целью уточнения полученных результатов была выполнена видеосъемка струи двухфазного потока скоростной видеокамерой High Speed Star FASTCAM SA5. Сначала использовался объектив Nikon типа Nikkor, фокусное расстояние 50 мм, относительное отверстие 1:1.2, расстояние до струи составляло 650 мм. Двухфазный поток освещался мощными галогеновыми лампами. На первом кадре (рис. 10) слева видна область повышенной массовой концентрации. Эта область движется несколько быстрее других областей (кадры 2-6), причём массовая концентрация частиц при движении постепенно падает. Уменьшается и скорость фронта области высокой концентрации. На кадре 8 слева видна новая область высокой концентрации, а на кадре 9 видно, что скорость её движения выше, чем в данный момент времени у предшествующей области (смещение больше). Таким образом, анализ полученной видеосъемки показал, что течение нестационарное, наблюдаются сильные пульсации, причём периодически волны догоняют впереди идущие волны и сливаются с ними. Это усложняет получение характеристик двухфазного течения и повышает погрешность измерений.

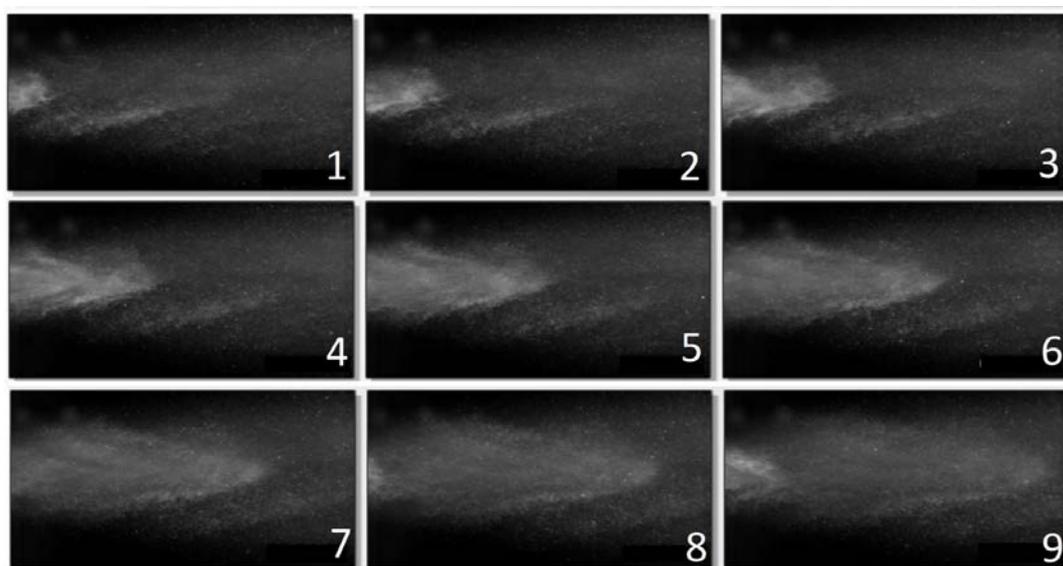


Рис. 10. Кадры струи со скоростной видеокамеры: время между кадрами 1/15000 с

Для измерения размеров частиц по изображениям, полученным скоростной видеокамерой, использовался объектив Canon с переменным фокусным расстоянием 75-300 мм, установленный в специальном тубусе. Это позволило получить на матрице видеокамеры увеличенное в 12.5 раза изображение частиц (при фокусном расстоянии 300 мм). Масштабный фактор 46.95 пиксель/мм. Для подсветки применялся лазерный «нож». На рис. 11 приведена одна из фотографий изображения потока. Размеры регистрируемой области составляют $10 \times 10 \times 3$ мм³. На фотографии видно, что размеры частиц варьируются в широких пределах, их форма близка к сферической, концентрация частиц в этой области достаточно высока.

Для измерения распределения размеров и концентрации частиц в поперечном сечении струи была проведена видеосъемка на расстоянии 350 мм от среза сопла. Объект исследования перемещался с шагом 10 мм. Для каждого положения объекта с помощью специально разработанной программы для алгоритма [7] по изображению рассчитывалось распределение частиц по размерам.

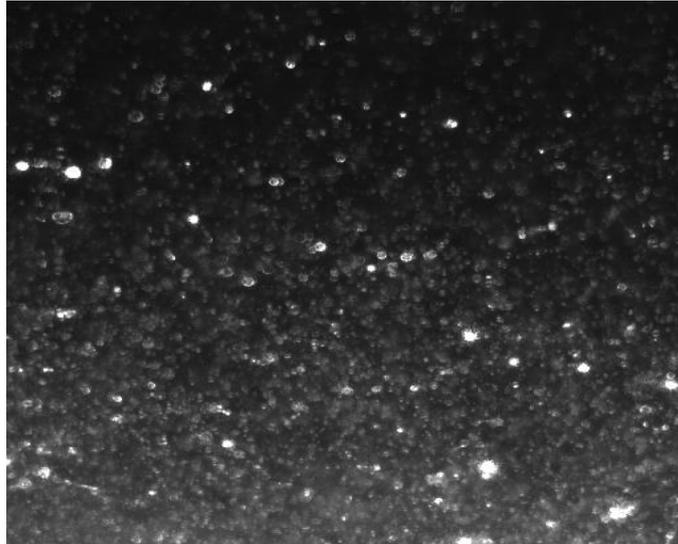


Рис. 11. Изображение со скоростной видеокамеры. Размер области $10 \times 10 \times 3 \text{ мм}^3$

Полученное распределение усреднялось по выборке изображений, после чего рассчитывались средний по выборке диаметр Заутера и средняя счётная концентрация для данного положения объекта исследования. Затем проводились расчёты для следующего положения. Результаты расчётов представлены на рис. 12, 13.

В центре струи диаметр частиц наименьший (порядка 120 мкм), а концентрация наибольшая (порядка $4.2 \times 10^3 \text{ 1/см}^3$). По мере удаления от оси размер растёт, причём по-разному для областей выше и ниже оси, и достигает 170-200 мкм на расстоянии от оси 60 мм. Счётная концентрация при этом падает в 2 раза. На расстоянии 70-80 мм от оси поток практически отсутствовал. Сравнение этих результатов с результатами, полученными по индикатрисе рассеяния (рис. 9), показывает, что они отличаются на 20% в центре и на 25% – на периферии. Это связано, по-видимому, с нестационарностью течения.

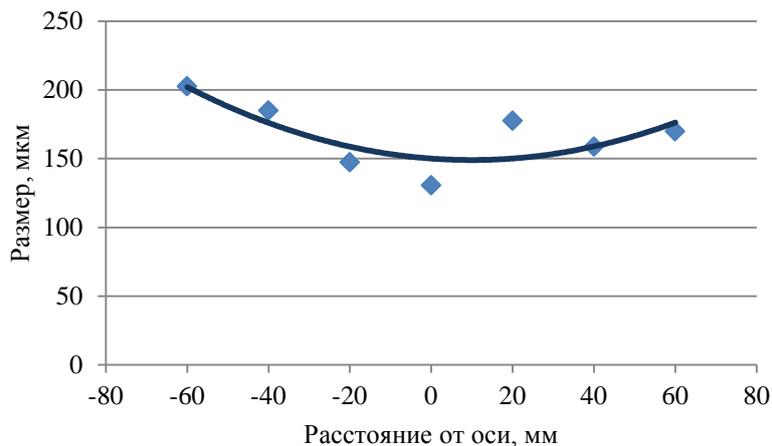


Рис. 12. Зависимость диаметра Заутера d_{32} от расстояния до оси струи: расстояние от среза сопла 350 мм

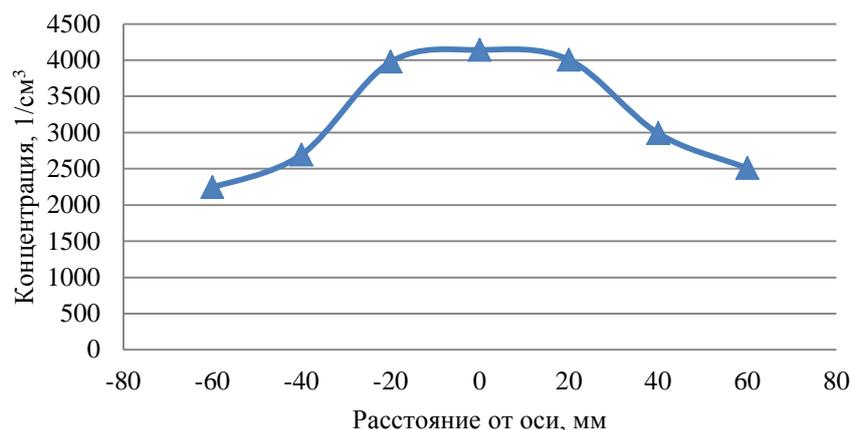


Рис. 13. Зависимость счётной концентрации от расстояния до оси струи: расстояние от среза сопла 350 мм

Заключение

Проведённое экспериментальное исследование нового разработанного газодинамического смесителя закрытого типа с двухфазным рабочим телом, работающего в диапазоне объёмных концентраций, соответствующих газокапельной структуре, показало, что небольшое добавление (порядка 2% по массе) газа, например, воздуха, может существенно влиять на процессы смешения жидкости и газа (топлива с воздухом) за счёт турбулизации и повышения энергетики конденсированной фазы при формировании двухфазных газокапельных струй.

Предложенная конструктивная схема (с учётом равенства давления рабочих тел на входе) при использовании газодинамического смесителя в камере сгорания двигателя может позволить снизить давление подачи топлива. Воздух, отбираемый для смесителя, далее будет использован в камере сгорания.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ.

Библиографический список

1. Зуев Ю.В., Истомина Е.А., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Чабанов В.А. Разработка и исследование смесительных устройств // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях «NPNG 2014». 2014. М.: Московский авиационный институт, 2014. С. 96-98.
2. Бантиков Д.Ю., Гречишников О.В., Роголев В.В., Росляков А.Д., Цибизов Ю.И. Пути совершенствования горелок двухзонных камер сгорания // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5 (47), ч. 2. С. 88-94.
3. Lund M.T., Sojka P.E., Lefebvre A.H., Gosselin P.G. Effervescent Atomization at Low Mass Flow Rates. Part 1: The Influence of Surface Tension // Atomization and Sprays. 1993. V. 3, Iss. 1. P. 77-89. DOI: 10.1615/atomizspr.v3.i1.40
4. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Berlin: Springer, 1998. 252 p.
5. Зимин Э.П., Кругерский А.М., Пожарнов В.А. Использование инвариантов малоуглового рассеяния света для диагностики дисперсной фазы газожидкостной смеси // Межвузовский тематический сборник научных трудов «Газотермодинамика многофаз-

ных потоков в энергоустановках». Вып. 2. Харьков: Харьковский авиационный институт, 1979. С. 125-130.

6. Зуев Ю.В., Истомин Е.А., Решетников В.А., Чабанов В.А. Система лазерных измерений дисперсного состава двухфазных потоков // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21, № 5. С. 80-87.

7. National Instruments.

http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370281P-01/imaqvision/imaq_count_objects_2/

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CLOSED-TYPE GAS-DYNAMIC MIXER

© 2016

- I. A. Lepeshinsky** Doctor of Science (Engineering), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, igorlepeh@yandex.ru
- V. A. Reshetnikov** Candidate of Science (Physics and Mathematics) Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, vresh031152@mail.ru
- I. A. Zarankevich** postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, zarankevich@yandex.ru
- E. A. Istomin** Candidate of Science (Engineering), Deputy Chief Designer, Experimental Design Bureau «Kristall», eistomin@inbox.ru
- I. V. Antonovsky** postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, antonovskij@mail.ru
- A. A. Guzenko** postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation, a_guzenko_89@mail.ru

The article presents a new gas-dynamic mixer – a closed-type one. The structure of a two-phase flow generated by the mixer, the disperse phase velocity diagram, the size and concentration of drops are experimentally investigated. Pulsation characteristics of a disperse phase are calculated. The mixer ensures the operation of a system that produces high-concentration two-phase gas-droplet streams for various values of consumption and pressure of working fluids. It is established, that, thanks to the presence of air in a two-phase working fluid the liquid is accelerated in the initial part of the stream and then it is decelerated. It should be noted that the stream under consideration is a polydisperse one: there are sites of very small particles which the optics practically does not resolve, and there are very large drops. The results of dispersion measurements using different methods are in close agreement. It is also experimentally established that the maximum pulsations take place at the nozzle outlet and there are local minima in the two-phase stream.

Gas-dynamic mixer, two-phase flow, dispersed phase, velocity, size and concentrations fields, PIV-method, fluctuating velocity.

Citation: Lepeshinskiy I.A., Reshetnikov V.A., Zarankevich I.A., Istomin E.A., Antonovskiy I.V., Guzenko A.A. Experimental research of the closed-type gas-dynamic mixer. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 70-80. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-70-80

References

1. Zuev Yu.V., Istomin E.A., Lepeshinskiy I.A., Reshetnikov V.A., Chabanov V.A. Razrabotka i issledovanie smesitel'nykh ustroystv. *Materialy X Mezhdunarodnoy konferentsii po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh «NPNG' 2014»*. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2014. P. 96-98. (In Russ.)
2. Bantikov D.Y., Grechishnikov O.V., Rogalev V.V., Roslyakov A.D., Thybizov Yu.I. Ways of improving burners of two-staged combustion chambers. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No. 5 (47), part 2. P. 88-94. (In Russ.)

3. Lund M.T., Sojka P.E., Lefebvre A.H., Gosselin P.G. Effervescent Atomization at Low Mass Flow Rates. Part 1: The Influence of Surface Tension. *Atomization and Sprays*. 1993. V. 3, Iss. 1. P. 77-89. DOI: 10.1615/atomizspr.v3.i1.40

4. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Berlin: Springer, 1998. 252 p.

5. Zimin E.P., Krugerskiy A.M., Pozharnov V.A. Ispol'zovanie invariantov malouglovogo rasseyaniya sveta dlya diagnostiki dispersnoy fazy gazozhidkostnoy smesi. *Mezhvuzovskiy tematicheskoy sbornik nauchnykh trudov «Gazotermodynamika mnogofaznykh potokov v energoustanovkakh»*. Vypusk 2. Kharkiv: Kharkiv Aviation Institute Publ., 1979. P. 125-130. (In Russ.)

6. Zuev Yu.V., Istomin E.A., Lepeshinskii I.A., Reshetnikov V.A., Chabanov V.A. System of the laser measurements by particulate composition for two-phase flows. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*. 2014. V. 21, no. 5. P. 80-87. (In Russ.)

7. National Instruments. Available at: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370281P-01/imaqvision/imaq_count_objects_2/