

Научная статья  
УДК 532.529.5  
DOI: 10.34759/vst-2023-2-116-121

## ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА СТРУЙНОЙ ФОРСУНКОЙ

Игорь Александрович Лепешинский<sup>1✉</sup>, Никита Александрович Кучеров<sup>2</sup>, Полина Викторовна Зотикова<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

<sup>1</sup> igorlepeh@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> n.kutcherov@bk.ru

<sup>3</sup> chekmenevapolina024@gmail.com

**Аннотация.** С помощью монодисперсной гетерогенной модели проведено решение задачи истечения двухфазного потока газокапельной структуры из цилиндрического отверстия с целью определения коэффициентов скорости и расхода фаз и поведения диспергированной струи. Решение данной проблемы позволяет использовать двухфазные газокапельные потоки для организации смесеобразования в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. Полученная информация о коэффициенте скорости жидкой фазы, как показано в дополнительном одномерном расчете параметров, позволяет решать обратную задачу диспергирования двухфазного газокапельного потока.

**Ключевые слова:** двухфазный газокапельный поток, моделирование, истечение из отверстия

**Для цитирования:** Лепешинский И.А., Кучеров Н.А., Зотикова П.В. Диспергирование двухфазного потока струйной форсункой // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 116–121. DOI: 10.34759/vst-2023-2-116-121

Original article

## A TWO-PHASE FLOW DISPERSION BY THE JET NOZZLE

Igor' A. Lepeshinskiy<sup>1 ✉</sup>, Nikita A. Kucherov<sup>2</sup>, Polina V. Zotikova<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

<sup>1</sup> igorlepeh@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> n.kutcherov@bk.ru

<sup>3</sup> chekmenevapolina024@gmail.com

### Abstract

The issue of liquid dispersion is of necessity in the design of air-jet engine combustion chamber and power plant. The article solved the solution of the two-phase gas-drop flow structure outflow from the cylindrical orifice to determine both velocity and gas consumption coefficients, as well as dispersed jet behavior. In the issues of the two-phase gas-drop flow forming with subsequent liquid phase dispersing (disintegration) in the combustion chamber of the jet-air engine, determining values of the velocity coefficients and phases consumption coefficients simplifies such devices designing for the intended result obtaining.

Preliminary design of spraying devices, such as mixers, injectors and devices involved in mixture formation is necessary when the air-jet engines combustion chambers designing. These devices operate on a two-phase working fluid, where the volume fraction of the gas phase concentration is equal or greater than the liquid concentration. Knowing the values of the velocity coefficients and phase flow rates allows solving the inverse problem. Thus, the purpose of this task consists in developing a technique for determining the velocity coefficients and phase flow rates.

The solution was performed by numerical methods employing the monodisperse heterogeneous model of two-phase flow. The flow of a two-phase flow through a cylindrical orifice of a 2 mm diameter in a jet nozzle with a given geometry was being simulated, where the nozzle length to diameter ratio equaled approximately to one. While simulation, the grid-independent solution was obtained with an error not exceeding 5%, which demonstrates the high degree of the computation

© Лепешинский И.А., Кучеров Н.А., Зотикова П.В., 2023

accuracy. As the result of simulation, velocity coefficients and phase flow rates were determined. The obtained information on the liquid phase velocity coefficient and flow coefficient allows solving the inverse problem of the two-phase gas-drop flow dispersing as is shown in the additional one dimension computation of parameters. It is worth noting that the velocity coefficients exceed one, which is shown for the first time. Such values of quantities are being explained by physics of the complex interphase interaction. As far as the gas phase velocity at definite values of the initial parameters appears to be much higher than that of a liquid, which leads to extra acceleration, so that the velocity coefficient adopts a value greater than one.

The results obtained in this work may be applied not only in the combustion chambers of the air-jet engines, but in the design of other atomizing devices operating on a two-phase working body of a gas-drop structure as well.

**Keywords:** two-phase gas-drop flow, numerical modeling, outflow from an orifice

**For citation:** Lepeshinskii I.A., Kucherov N.A., Zotikova P.V. A Two-Phase Flow Dispersion by the Jet Nozzle. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 116-121. DOI: 10.34759/vst-2023-2-116-121

## Введение

Существует значительное количество работ, посвященных диспергированию жидкости с помощью форсунок с двухфазным рабочим телом [1–7]. Решение вопроса диспергирования жидкости необходимо при проектировании различных камер сгорания воздушно-реактивных двигателей и энергетических установок. В [1–7] исследуются дисперсные характеристики, ставятся вопросы корректности моделирования течения, однако определение коэффициентов расхода и скорости фаз двухфазного газокапельного потока, истекающего из отверстия, не рассматривается. Отсутствие достаточных знаний по данному вопросу приводит, в частности, к тому, что в экспериментальном исследовании смесителя форсажной камеры сгорания авиационного двигателя [8], проведенном с помощью лазерно-оптических и зондовых методов [9], не решалась задача определения скорости и расходов фаз. Знание этих коэффициентов позволяет решить обратную задачу диспергирования двухфазного потока. Цель данной работы – расчетное определение коэффициентов скоростей каждой фазы при диспергировании двухфазного газокапельного потока. Особенностью диспергирования двухфазных потоков является межфазовое взаимодействие между количеством движения и энергией, приводящее к существенному отличию параметров диспергирования двухфазного потока по сравнению с параметрами диспергирования жидкости отдельно, при одинаковых граничных условиях. Параметры потока при дроблении двухфазного потока зависят от его структуры, которая подразделяется на газокапельную и пузырьковую. Очевидно, что такие важные характеристики диспергирования, как коэффициенты скорости и расхода фаз, также принципиально отличаются по сравнению с однофазными рабочими телами. В двухфазном потоке, благодаря межфазовому обмену энергией и количеством движения, значения этих коэффициентов для каждой фазы могут превышать единицу.

## Моделирование процесса истечения потока

Для решения поставленной задачи было проведено численное моделирование процесса истечения газокапельного потока из отверстия с использованием

модели Эйлера–Эйлера, а в качестве модели турбулентности использовалась модель турбулентности переноса сдвигового напряжения Ментера (SST). Расчетная область (рис. 1) представляет собой пространство форсунки 1 радиусом  $r_1 = 7$  мм, длиной  $l_1 = 13$  мм с отверстием 2 диаметром  $r_2 = 0,65$  мм и длиной 1,5 мм, а также областью факела распыла 3.

В качестве входных параметров форсунки задавались: скорость воздуха  $w_{r_0} = 0,9$  м/с; скорость жидкости  $w_{ж_0} = 0,05$  м/с; объемная доля воздуха  $\alpha_{r_0} = 0,95$ ; полная температура 300К, размер капель жидкости 50 мкм, а в качестве выходных параметров форсунки – статическое давление, равное атмосферному, т. е.  $B_0 = 101325$  Па.

Расчеты проводились с использованием структурированной и неструктурированной сетки с различным количеством ячеек. В результате расчетов по уравнениям модели Эйлера–Эйлера в двумерной осесимметричной постановке модели были определены параметры потока для сеток, указанных в табл. 1.

Для определения сеткнезависимости решения сравнивались значения коэффициента скорости жидкости  $\varphi_{ж}$  и коэффициента расхода жидкости  $\psi_{ж}$ , полученные в результате расчета. Коэффициент скорости жидкости определяли как

$$\varphi_{ж} = \frac{w_{ж}}{w_{ж_t}}, \quad (1)$$

где  $w_{ж}$  – действительная скорость жидкости, полученная в результате расчета путём осреднения по ее расходу, м/с;  $w_{ж_t}$  – теоретическая скорость жидкости, м/с:

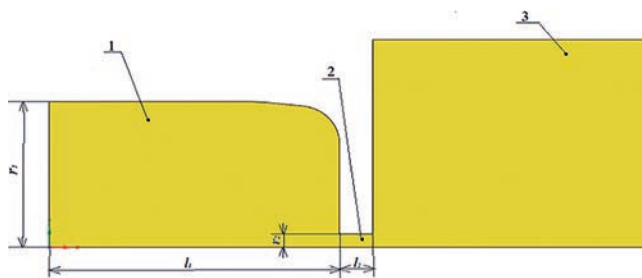


Рис. 1. Расчетная область течения газокапельного потока

Таблица 1

Варианты расчета

№ сетки	Тип сетки	Число ячеек	Imbalans1, %	Imbalans2, %	Φ <sub>ж</sub>	Ψ <sub>ж</sub>	ΔP, Па
1	Неструктурированная	68995	1,53	0,054	2,56	2,39	17469
2	Структурированная	47020	1,49	2,06	2,56	2,22	18843
3	Структурированная	207695	4,17	4,63	2,49	2,13	19743
4	Структурированная	526554	2,7	0,95	2,49	2,16	19711

$$w_{ж,i} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ж}}}, \tag{2}$$

где ΔP – разница между статическим давлением на входе и на выходе расчетной области. Давление на входе было определено в процессе расчета (табл. 1), Па; ρ<sub>ж</sub> – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент расхода жидкости:

$$\Psi_{ж} = \frac{G_{ж}}{G_{ж,t}}, \tag{3}$$

где G<sub>ж</sub> – действительный расход жидкости, кг/с; G<sub>ж,t</sub> – теоретический расход жидкости, кг/с,

$$G_{ж} = (1 - \alpha)\rho_{ж}w_{ж,i}F, \tag{4}$$

где F – площадь поперечного сечения входного отверстия форсунки, м<sup>2</sup>.

Сравнительные результаты расчетов представлены в табл. 1. Imbalans1 означает погрешность (в процентах) расходов жидкости на входе в форсун-

ку и выходе из расчетной области, а Imbalans 2 – погрешность расходов жидкости на входе в форсунку и на выходе из ее отверстия. Эти значения показывают уровень баланса по закону сохранения расходов жидкости и газа.

Как видно из данных табл. 1, сеткoneзависимое решение получается уже на сетке № 3. Ниже представлены результаты расчета варианта № 4.

На рис. 2 показано изменение скорости жидкости во всей расчетной области, на рис. 3 – изменение скорости газа.

Изменение скорости жидкости и воздуха на оси форсунки, оси отверстия и области за форсункой представлено на рис. 4–6. Для удобства ось форсунки разделена на три участка: от входа до отверстия (рис. 4), отверстие (рис. 5) и от среза до конца расчетной области (рис. 6). Расчет ведется от начального сечения форсунки, координата абсциссы которого 0. Вход в отверстие имеет координату 0,013 мм, а выход из отверстия – координату 0,0146 мм; далее лежит об-

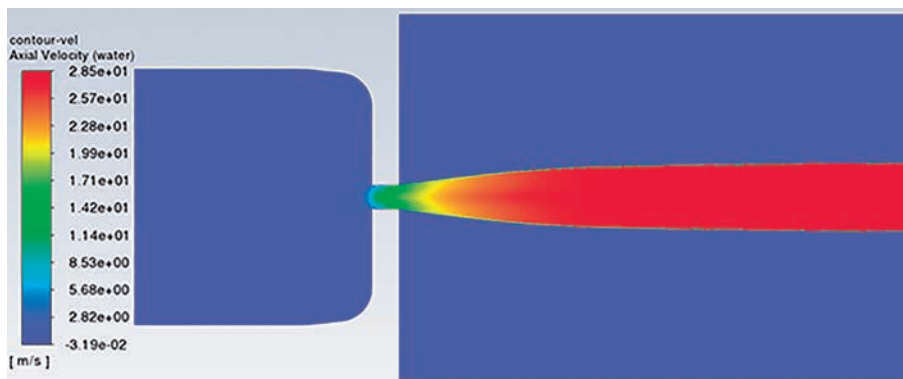


Рис. 2. Меридиональная проекция поля скорости жидкости

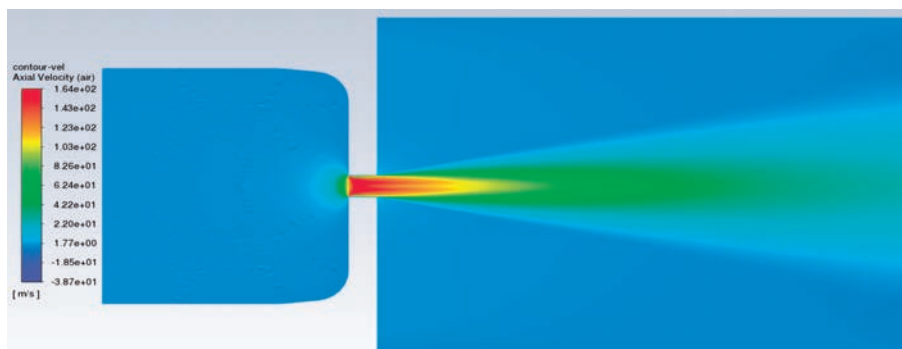


Рис. 3. Меридиональная проекция поля скорости газа

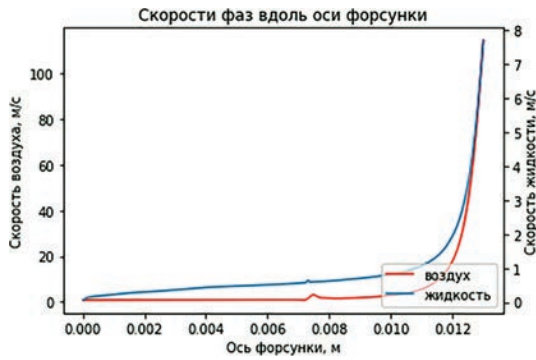


Рис. 4. Скорости жидкости и воздуха на оси форсунки

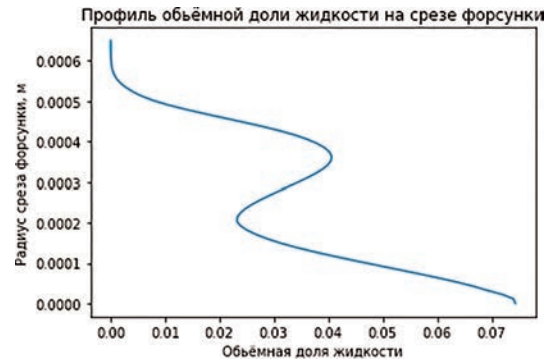


Рис. 8. Профиль объемной концентрации жидкости на срезе форсунки

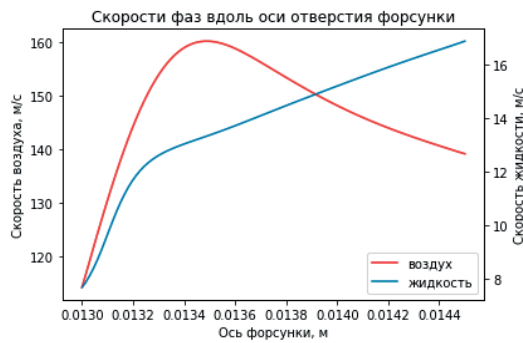


Рис. 5. Скорости жидкости и воздуха на оси отверстия форсунки

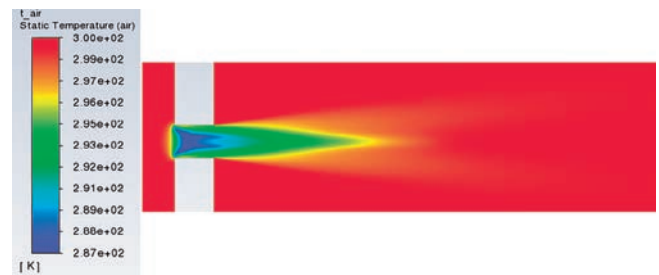


Рис. 9. Поле температуры газа в отверстии и вблизи него

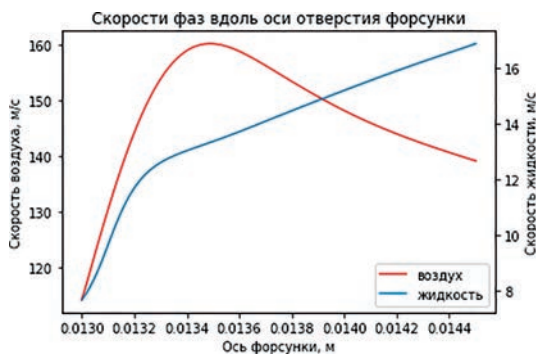


Рис. 6. Скорости фаз вдоль оси факела распыла форсунки

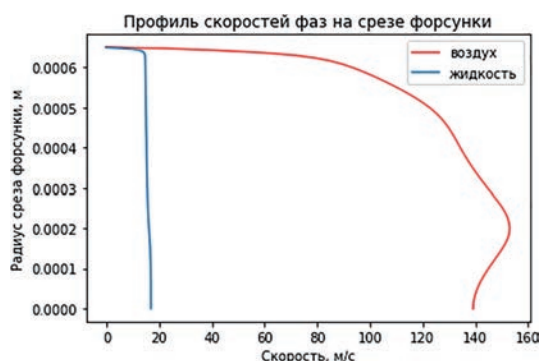


Рис. 7. Скорости фаз в поперечном сечении на выходе из форсунки

ласть распространения струи в окружающем пространстве. Также ниже представлены профили скоростей фаз (рис. 7) и объемной доли жидкости (рис. 8) в сечении среза отверстия форсунки.

Профиль температуры газа (рис. 9) показывает, что в данном случае теплообмен между фазами незначителен, а на изменение температуры газа влияет окружающая среда.

Результаты расчета, приведенные на графиках (рис. 2–7), свидетельствуют о том, что газовая фаза на всем протяжении процесса разгоняет капли жидкости.

Помимо приведенных на графиках распределенных параметров, получены значения расходов газовой  $G_r = 0,000185$  кг/с и жидкостной фазы  $G_{ж} = 0,00038$  кг/с, концентрации фаз  $\Pi_1 = G_{ж}/G_r = 2,0256$  и значения объемной доли газа  $\alpha_r = 0,98$ . Скорости жидкости  $w_{ж} = 15,277$  м/с и газа  $w_r = 123,5$  м/с на срезе форсунки были получены путем осреднения профилей (рис. 7 и 8) по расходу. Коэффициент скорости жидкости  $\varphi_{ж} = 2,5$  определен ранее (см. табл. 1 для расчета № 4). Коэффициент скорости газа:

$$\varphi_r = \frac{w_r}{w_{r1}}, \tag{5}$$

где  $w_r$  – скорость газа на срезе форсунки, м/с;  $w_{r1}$  – теоретическая скорость истечения газа на срезе форсунки, м/с,

$$w_{r1} = \lambda_r \left( \frac{2k}{k+1} RT^* \right), \tag{6}$$

где  $R = 287$  кДж/(кг · К) – универсальная газовая постоянная;  $T^*$  – температура торможения на срезе форсунки,  $T^* = 300$  К;  $k = 1,4$  – коэффициент адиабаты;  $\lambda_r$  – приведенная скорость газа:

$$\lambda_r = \left[ \frac{k+1}{k-1} \left( 1 - \pi(\lambda_r)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right]^{0,5}, \tag{7}$$



где

$$\pi(\lambda_r) = \frac{B_0}{\Delta P + B_0}. \quad (8)$$

Коэффициент скорости газа  $\varphi_r = 0,3$ .

Определив коэффициенты скорости, замечаем, что коэффициент скорости жидкости на срезе намного больше возможного теоретического коэффициента скорости, который обычно меньше или равен единице. Это связано с тем, что скорость жидкости на срезе форсунки, см. рис. 6, увеличивается в результате ускорения ее газом. Очевидно, что по мере увеличения значения  $\Pi_1$  значения коэффициентов скорости газа и жидкости будут уменьшаться.

### Одномерный расчет

В качестве проверки правильности многомерного расчета приводится одномерный расчет с учетом значений коэффициентов скорости фаз, рассчитанных выше. Результатам правильности расчета соответствует равенство численных значений скоростей фаз на срезе форсунки и их расходов.

Для одномерного расчета задаются: радиус отверстия форсунки  $r_2$ , уже рассчитанный перепад давления  $\Delta P$ , массовая концентрация  $\Pi_1$ , а также значения коэффициентов скорости  $\varphi_{ж}$ ,  $\varphi_r$ .

Для определения численного значения расходов и скоростей фаз на входе вычисляются такие параметры:

– плотность воздуха  $\rho_r$  на срезе форсунки:

$$\rho_r = \frac{P_0}{RT} = 1,17 \text{ [кг/м}^3\text{]}; \quad (9)$$

– отношение плотностей фаз  $\Pi_5$  на срезе форсунки:

$$\Pi_5 = \frac{\rho_{ж}}{\rho_r} = 853; \quad (10)$$

– скорости жидкости  $w_{ж}$  и газа  $w_r$  на срезе форсунки с учетом коэффициентов:

$$w_{ж} = \varphi_{ж} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ж}}} = 15,648 \text{ [м/с]}; \quad (11)$$

$$w_r = \varphi_r \lambda_r \left( \frac{2k}{k+1} RT \right)^{0,5} = 126,95 \text{ [м/с]}; \quad (12)$$

– значение отношения скоростей фаз  $\Pi_2$  на выходе:

$$\Pi_2 = \frac{w_{ж}}{w_r} = 0,123, \quad (13)$$

– объемная доля газа  $\alpha_r$  на срезе форсунки:

$$\alpha_r = \frac{\Pi_2 \Pi_5}{\Pi_1 + \Pi_2 \Pi_5} = 0,98. \quad (14)$$

Зная значения рассчитанных параметров, можно определить расходы фаз, а также их скорости на входе в форсунку.

Расходы фаз  $G_{ж}$ ,  $G_r$  определяются следующими выражениями:

$$G_{ж} = (1 - \alpha_r) \rho_{ж} w_{ж} F = 0,0004 \text{ [кг/с]}; \quad (15)$$

$$G_r = \alpha_r \rho_r w_r F = 0,00019 \text{ [кг/с]}, \quad (16)$$

где  $F$  – площадь выходного сечения форсунки, мм<sup>2</sup>.

Зная площадь насадка  $F_0$  и объемную долю газа на входе  $\alpha_{r_0}$ , находим значения скоростей фаз на входе в форсунку:

$$w_{ж_0} = \frac{G_{ж}}{(1 - \alpha_{r_0}) \rho_{ж} F_0} = 0,052 \text{ [м/с]}, \quad (17)$$

$$w_{r_0} = \frac{G_r}{\alpha_{r_0} \rho_r F_0} = 0,95 \text{ [м/с]}, \quad (18)$$

Полученные значения скоростей фаз практически совпадают со значениями, задаваемыми на входе.

### Выводы

Наличие корреляционной модели расчёта коэффициентов скоростей фаз, определенных выше, позволяет рассчитывать газокапельные струйные форсунки без необходимости проведения многомерного численного расчета, что может быть применено в методиках расчета, аналогичных предложенной в [20].

В работе также впервые показано, что при диспергировании такого потока коэффициент скорости конденсированной фазы для двухфазных газокапельных потоков может превышать единицу.

### Список источников

1. Семкин Е.В. Методика моделирования процесса течения жидкости в смесителе, состоящем из двух малорасходных центробежных форсунок // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. №4. С. 141–154. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-141–154
2. Мосолов С.В., Сидлеров Д.А. Анализ особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД со струйно-центробежными и центробежно-центробежными форсунками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 2(107). С. 60–71.
3. Семкин Е.В. Сравнение трех моделей течения и перемешивания модельных рабочих тел в смесительном элементе ЖРДМТ тягой 10 ... 15 Н, основанных на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 2(110). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-2-2057
4. Егорычев В.С., Шаблий Л.С., Кудинов И.В. Моделирование двухфазных потоков в форсунке камеры ЖРД с помощью ANSYS CFD // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 6–3. С. 667–670.
5. Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Прохоров А.Н. и др. Анализ влияния типа форсунок и направления впрыска жидкости на эффективность двухфазного смесеобразования в канале постоянного сечения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 7(676). С. 94–104.
6. Khaleghi H., Farani Sani H., Ahmadi M., Mohammadzadeh F. Effects of Turbulence on the secondary breakup of droplets in diesel fuel sprays // Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021. Vol. 235. No. 2-3, pp. 387-399. DOI: 10.1177/0954407020958581

7. Cui B., Cai M., Li Y. Influence of air–water two-phase flow on the performance of a high-speed inducer // *Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 234(6), pp. 947–960. DOI: 10.1177/0956797617753606
8. Gelfand B.E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag // *Progress in Energy and Combustion Science*. 1996. Vol. 22. No. 3, pp. 201–265. DOI:10.1016/S0360-1285(96)00005-6
9. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Натанзон М.С., Косов Д.М. Режимы дробления капель и критерии их существования // *Инженерно-физический журнал*. 1981. Т. 40. № 1. С. 64–70.
10. Engel O.G. Fragmentation of waterdrops in the zone behind an air shock // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1958. Vol. 60. No. 3, pp. 245–280.
11. Ranger A.A., Nicholls J.A. Aerodynamics shattering of liquid drops // *AIAA Journal*. 1969. Vol. 7. No. 2, pp. 285–290.
12. Pilch M., Erdman C.A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop // *International Journal of Multiphase Flow*. 1987. Vol. 13. No. 6, pp. 741–757. DOI: 10.1016/0301-9322(87)90063-2
13. Бойко В.М., Папырин А.Н., Поплавский С.В. О динамике дробления капель в ударных волнах // *Прикладная механика и техническая физика*. 1987. № 2. С. 108–115.
14. Бойко В.М., Поплавский С.В. Экспериментальное исследование двух типов срывного разрушения капли в потоке за ударной волной // *Физика горения и взрыва*. 2012. Т. 48. № 4. С. 76–82.
15. Марчуков Е.Ю., Мухин А.Н., Лепешинский И. и др. Экспериментальное исследование смесительного устройства форсажной камеры газотурбинного двигателя // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2022. № 4. С. 3–10. DOI: 10.31857/S0568528122040090
16. Лепешинский И.А., Ципенко А.В., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Ся С. Совместное измерение газодинамических параметров двухфазных высококонцентрированных потоков лазерно-оптическими и зондовыми методами // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 3. С. 152–160.
17. Аврашков В.Н., Гнесин Е.М., Давиденко Д.М., Мещеряков Д.В., Шава К. Измерение полей скоростей в недорасширенной затопленной горячей струе газа с помощью лазерного измерителя скорости (piv-метод) // *Вестник Московского авиационного института*. 2012. Т. 19. № 1. С. 81–90.
18. Зуев Ю.В., Истомин Е.А., Лепешинский И.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.
19. Boiko V.M., Poplavski S.V. The complex of optical methods for study of gas-liquid jets // *AIP Conference Proceedings*. 2017. 1893(1): 030002. DOI: 10.1063/1.5007460
20. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Зотикова П.В. Многофорсуночный смеситель с двухфазным рабочим телом // *Насосы. Турбины. Системы*. 2021. № 1(38). С. 5–11.

## References

1. Semkin E.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 141–154. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-141-154
2. Mosolov S.V., Sidlerov D.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie*, 2016, no. 2(107), pp. 60–71.
3. Semkin E.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2021, no. 2(110). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-2-2057
4. Egorychev V.S., Shablii L.S., Kudinov I.V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, vol. 15, no. 6-3, pp. 667–670.
5. Aref'ev K.Yu., Voronetskiy A.V., Prokhorov A.N. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2016, no. 7(676), pp. 94–104.
6. Khaleghi H., Farani Sani H., Ahmadi M., Mohammadzadeh F. Effects of Turbulence on the secondary breakup of droplets in diesel fuel sprays. *Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021, vol. 235, no. 2-3, pp. 387–399. DOI: 10.1177/0954407020958581
7. Cui B., Cai M., Li Y. Influence of air–water two-phase flow on the performance of a high-speed inducer. *Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, 2020, vol. 234(6), pp. 947–960. DOI: 10.1177/0956797617753606
8. Gelfand B.E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, vol. 22, no. 3, pp. 201–265. DOI: 10.1016/S0360-1285(96)00005-6
9. Borisov A.A., Gel'fand B.E., Natanzon M.S., Kosov D.M. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1981, vol. 40, no. 1, pp. 64–70.
10. Engel O.G. Fragmentation of waterdrops in the zone behind an air shock. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1958, vol. 60, no. 3, pp. 245–280.
11. Ranger A.A., Nicholls J.A. Aerodynamics shattering of liquid drops. *AIAA Journal*, 1969, vol. 7, no. 2, pp. 285–290.
12. Pilch M., Erdman C.A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, vol. 13, no. 6, pp. 741–757. DOI: 10.1016/0301-9322(87)90063-2
13. Boiko V.M., Papyrin A.N., Poplavskii S.V. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1987, no. 2, pp. 108–115.
14. Boiko V.M., Poplavskii S.V. *Fizika goreniya i vzryva*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 76–82.
15. Marchukov E.Yu., Mukhin A.N., Lepeshinskii I. et al. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2022, no. 4, pp. 3–10. DOI: 10.31857/S0568528122040090
16. Lepeshinskii I.A., Tsipenko A.V., Reshetnikov V.A., Kucherov N.A., Sya S. Joint measurement of gas-dynamic parameters of two-phase highly concentrated flows by laser-optical and probe methods. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 152–160.
17. Avrashkov V.N., Gnesin E.M., Davidenko D.M., Meshcheriakov D.V., Chauveau C. Measurements in an underexpanded hot free jet (PIV a method). *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no 1, pp. 81–90.
18. Zuyev Y.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. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 80–87.
19. Boiko V.M., Poplavski S.V. The complex of optical methods for study of gas-liquid jets. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1893(1): 030002. DOI: 10.1063/1.5007460
20. Lepeshinskii I.A., Reshetnikov V.A., Kucherov N.A., Zotikova P.V. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2021, no. 1(38), pp. 5–11.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 12.02.2023.  
The article was submitted on 23.01.2023; approved after reviewing on 10.02.2023; accepted for publication on 12.02.2023.