

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ СИСТЕМЫ «СОПЛО—СТРУЯ» НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СТРУЙ

Лепешинский И.А.* , Антоновский И.В.** , Гузенко А.А.*** , Зуев Ю.В.****

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

* e-mail: igorlepeh@yandex.ru

** e-mail: antonovskij@mail.ru

*** e-mail: a_guzenko_89@mail.ru

**** e-mail: yuri_zuev@bk.ru

Представлены результаты численного исследования влияния граничных условий в форме безразмерных параметров и основных критериев подобия системы «сопло—струя» на распространение и геометрию двухфазных газокапельных струй. Влияние наиболее важных критериев и параметров в значительной степени связано с энергетикой и структурой системы и ее вкладом в интенсификацию турбулентности и межфазного взаимодействия. В частности, уменьшение перепада давления, увеличение размера капель, концентрации конденсированной фазы, массового расхода в исследованном диапазоне параметров увеличивают дальность двухфазной струи, при этом струя течет более компактно на все большем участке струи.

Ключевые слова: газ, капли, двухфазные течения, сопла, газокапельные струи, большие концентрации капель, геометрия струи.

Введение

Рассматриваются двухфазные газокапельные струи с высокой концентрацией конденсированной фазы (капель). Такие струи используются в следующих элементах реактивных двигателей и энергетических установок: камеры сгорания, устройства смешения, эжекторы, сепараторы и т.п., а получают формированием двухфазного рабочего тела в специальных устройствах и дальнейшего разгона его в соплах. Для управления такими струями необходимо знать, как влияют граничные условия в системе «сопло—струя» на геометрию двухфазной струи. Результаты теоретического и экспериментального исследования показали, что основными параметрами, определяющими геометрию двухфазной струи (дальность распространения и угол раскрытия такой струи), являются расходы фаз, концентрация, дисперсность конденсированной фазы, начальная скорость струи. Эти параметры струи формируются граничными условиями на входе и выходе из сопла. По сравнению с обычными однофазными (жидкостными) струями газокапельные струи имеют прямолинейную траекторию практически на всем участке распространения (жидкостные струи имеют баллистическую траекторию) и

двое большую дальность при одинаковых расходах жидкости и давлении в системах [1, 3]. Для определения величины влияния отмеченных выше параметров на распространение двухфазных газокапельных струй было проведено численное исследование.

О математических моделях расчета

Для расчета струи использовался вариант математической модели, приведенный в [1—7]. В данной работе рассматривается двухкомпонентная газовая струя с жидкими монодисперсными частицами (газовая фаза состоит из одного газа, и все частицы имеют один размер). В этой струе фазовые превращения, коагуляция и дробление частиц отсутствуют. Описание движения газа и капель проводится в переменных Эйлера. Математическая модель двухфазной струи состоит из системы осредненных уравнений, записанных в приближении пограничного слоя для каждой из фаз, и модели турбулентности, включающей выражения для моментов корреляции пульсационных параметров фаз [4]. Аналогичная модель, только без учета турбулентности [8—10], использовалась при расчете течения в сопле, причем были взяты оптимальные значения

параметров закона распределения давления в сопле m и n , равные единице [11].

Струи формировались разгоном сформированного в камере смешения двухфазного потока, течение которого в сопле рассчитывалось в соответствии с работой [8]. В качестве основных критериев подобия и безразмерных параметров использовались следующие величины, характеризующие течение как в сопле, так и в струе:

$$\Pi_1 = \frac{G_{ж}}{G_{г}}; \tag{1}$$

$$\Pi_5 = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}}; \tag{2}$$

$$\Pi_6 = \frac{d_{к}}{d_{с0}}; \tag{3}$$

$$\Pi_{27} = \frac{p_{н}}{p_{с0}}; \tag{4}$$

$$\Pi_{50} = \frac{w_{ж0}}{w_{ж.расп}}; \tag{5}$$

$$\bar{w}_{жm} = \frac{w_{жm}}{w_{ж.расп}}. \tag{6}$$

Здесь G — массовый секундный расход; ρ — плотность; d — диаметр; p — давление; w — скорость; индексы: ж — жидкость, г — газ, с — сопло, н — параметры окружающей среды, 0 — параметры на входе в сопло, расп — располагаемое значение параметра, m — параметры на оси струи; $\bar{w}_{жm}$ — безразмерная приведенная скорость.

Располагаемое значение скорости

$$w_{ж.расп} = \sqrt{2 \frac{p_{с0} \left(1 + \frac{\rho_{ж} w_{ж0}^2}{p_{с0}} - \Pi_{27} \right)}{\rho_{ж}}}. \tag{7}$$

В качестве характеристик распространения струи использовались значения безразмерной скорости жидкости на оси струи $\bar{w}_{жm}$, размерной скорости жидкости на оси струи $w_{жm}$ [м/с], радиуса R_{90} [м] на различных расстояниях сечения струи от сопла, безразмерного радиуса струи \bar{R}_{90} в калибрах начального диаметра струи (выходного сечения сопла), где R_{90} — радиус струи, содержащей 90% жидкости;

$$\bar{x} = \frac{x}{d_{с.вых}}. \tag{8}$$

Примеры расчета течений в сопле и струе по описанным выше моделям представлены на рис. 1—4.

Вариант граничных условий:

расход жидкости (воды) $G_{ж} = 1$ кг/с,

параметры на входе в сопло:

давление $p_0 = 4 \cdot 10^5$ Па,

скорость жидкости $w_{ж0} = 30$ м/с,

температуры фаз одинаковы и равны $T_0 = 288$ К,

концентрация жидкости $\Pi_1 = 40$,

рабочий газ — воздух,

размеры капель $d_{к} = 100$ мкм,

давление на выходе $p_{н} = 1 \cdot 10^5$ Па.

Графики представлены в безразмерной форме как отношение текущего значения параметра к на-

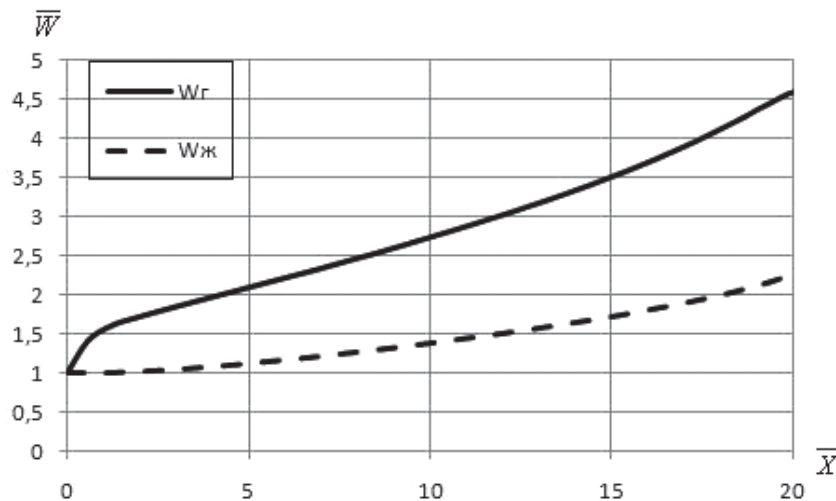


Рис. 1. Изменение безразмерных скоростей фаз

чальному, а длина канала как отношение текущей длины канала к начальному диаметру сопла:

$$\bar{x} = \frac{x}{d_{c0}} \tag{9}$$

На рис. 1 показано изменение скоростей фаз $\bar{w}_ж$ и $\bar{w}_г$ вдоль канала сопла \bar{x} , а на рис. 2 представлен профиль канала сопла — диаметр канала D

$$\bar{D} = \frac{d}{d_{c0}} \tag{10}$$

и распределение давления \bar{p} .

На рис. 3 показано изменение безразмерных скоростей фаз на оси струи вдоль продольной оси $\bar{w}_{жм}$ и $\bar{w}_{гм}$, а на рис. 4 — изменение безразмерных параметров в поперечном сечении струи $\bar{R}_{гп}$ — радиуса границы струи по газу, $\bar{R}_{1/2w}$ — границы

течения по половинной скорости на оси, $\bar{R}_{90\%}$ — границы струи, содержащей 90% жидкости.

Результаты численного исследования

На основе подобных расчетов проводилось дальнейшее исследование, результаты которого изложены ниже. На рис. 5 показана зависимость значений приведенной безразмерной скорости $\bar{w}_{жм}$ от критерия Π_{50} для трех сечений, расположенных на безразмерных расстояниях \bar{x} от выходного сечения сопла 1000, 1500, 2000 калибров начального диаметра струи, равного выходному сечению сопла. Расчет проводился для расхода жидкости $G_{ж} = 1$ кг/с при постоянных значениях $\Pi_1 = 40$, $\Pi_{27} = 0,25$ и безразмерной длине

$$\bar{l}_c = \frac{l_c}{d_{c0}}, \tag{11}$$

равной 10.

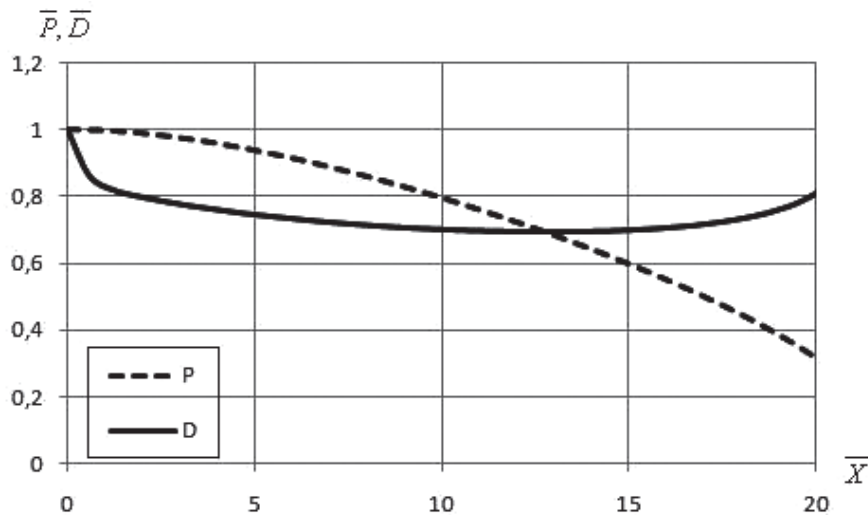


Рис. 2. Распределение безразмерного давления и геометрия профиля канала сопла

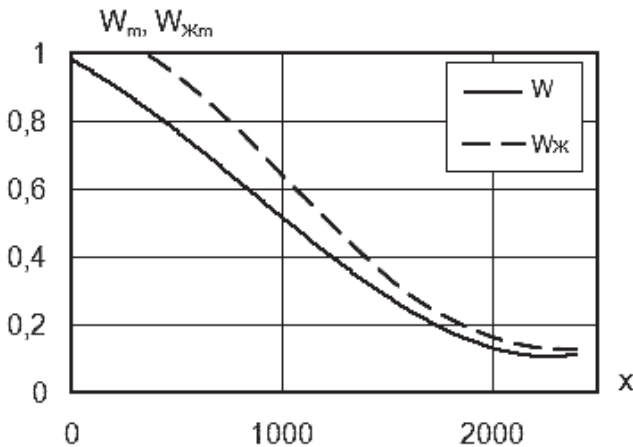


Рис. 3. Изменение безразмерных скоростей фаз на оси струи вдоль продольной оси

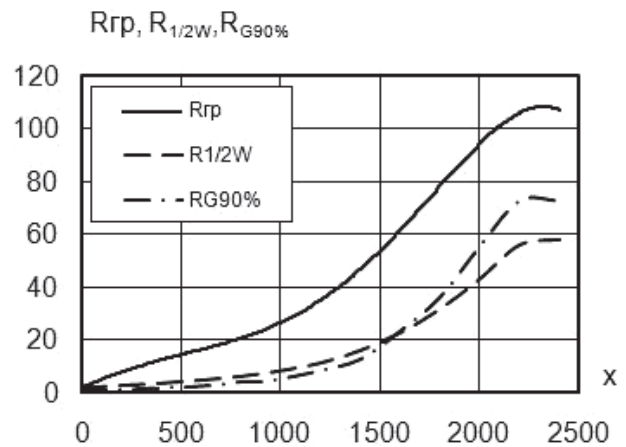


Рис. 4. Изменение безразмерных параметров в поперечном сечении струи

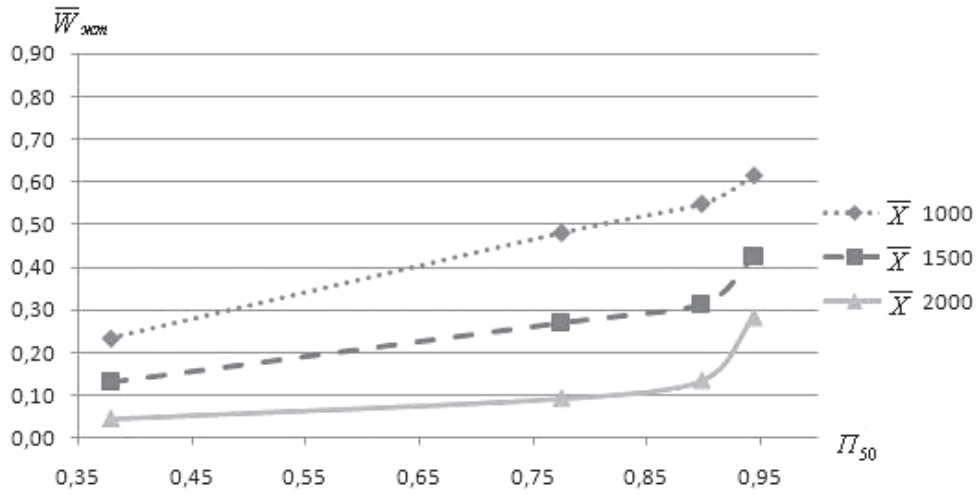


Рис. 5. Зависимость значений приведенной безразмерной скорости от критерия Π_{50} при $G_{ж} = 1$ кг/с

Увеличение критерия Π_{50} соответствует увеличению скорости впрыска жидкости на входе в сопло $w_{ж0}$, поэтому скорость при прочих равных условиях уменьшается. При этом на рис. 6 показано изменение безразмерного радиуса струи $\bar{R}_{90\%}$ в тех

же сечениях при одинаковых граничных условиях. Радиус увеличивается, струя расширяется, т.е. дальность струи уменьшается. Аналогичные расчеты проведены для $G_{ж} = 2$ кг/с (рис. 7, 8) и $G_{ж} = 20$ кг/с (рис. 9, 10).

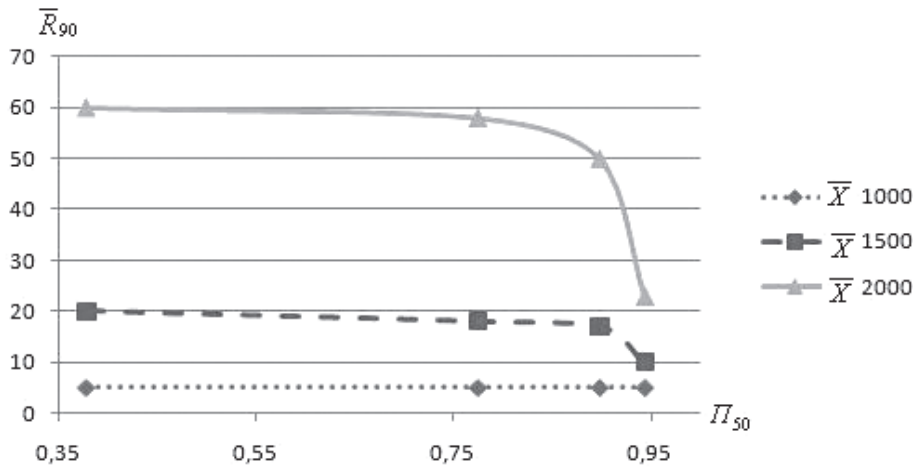


Рис. 6. Изменение безразмерного радиуса струи при $G_{ж} = 1$ кг/с

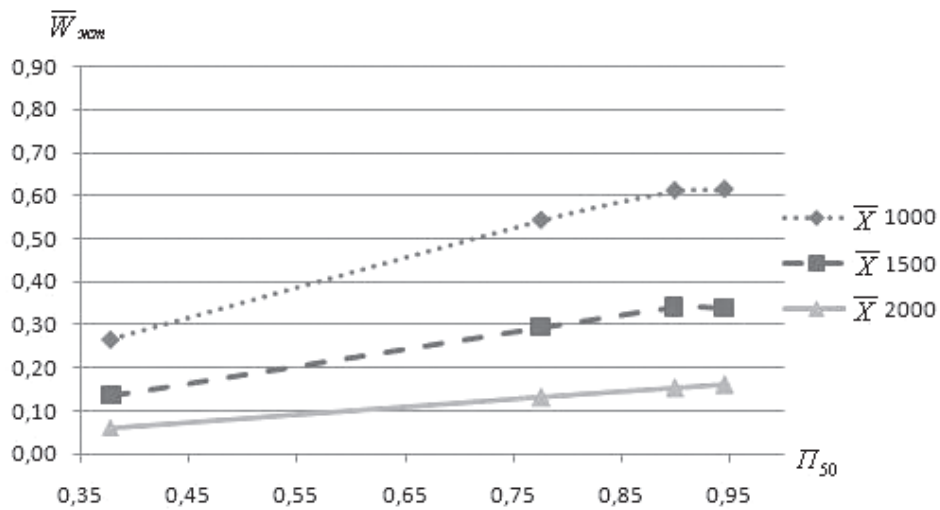


Рис. 7. Зависимость значений приведенной безразмерной скорости от критерия Π_{50} при $G_{ж} = 2$ кг/с

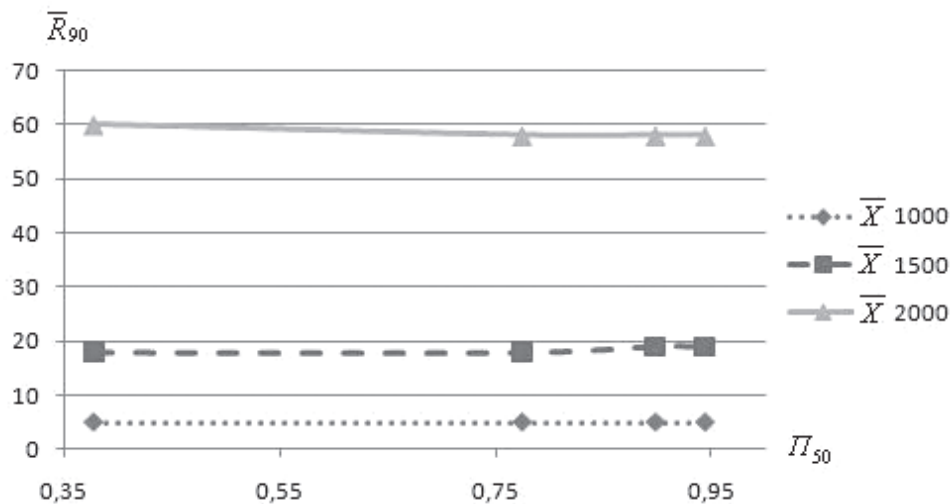


Рис. 8. Изменение безразмерного радиуса струи при $G_j = 2$ кг/с

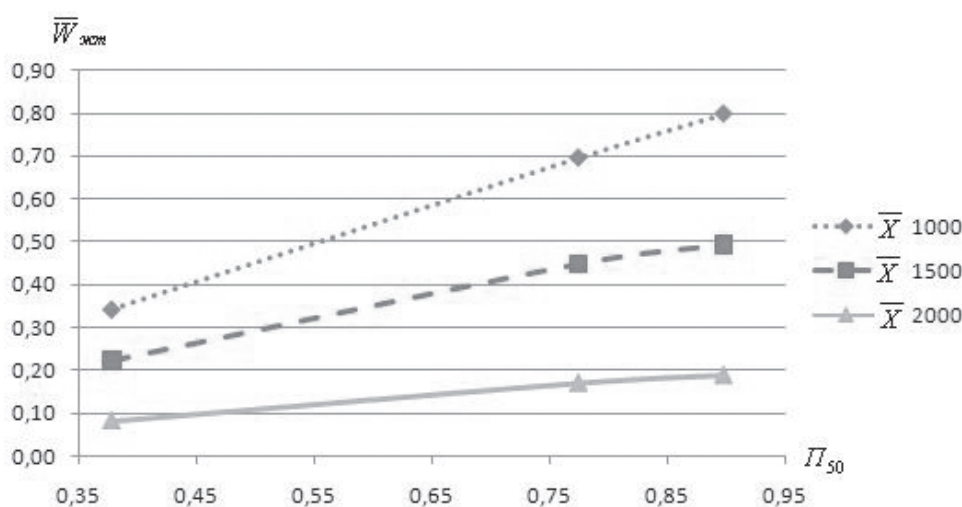


Рис. 9. Зависимость значений приведенной безразмерной скорости от критерия Π_{50} при $G_j = 20$ кг/с

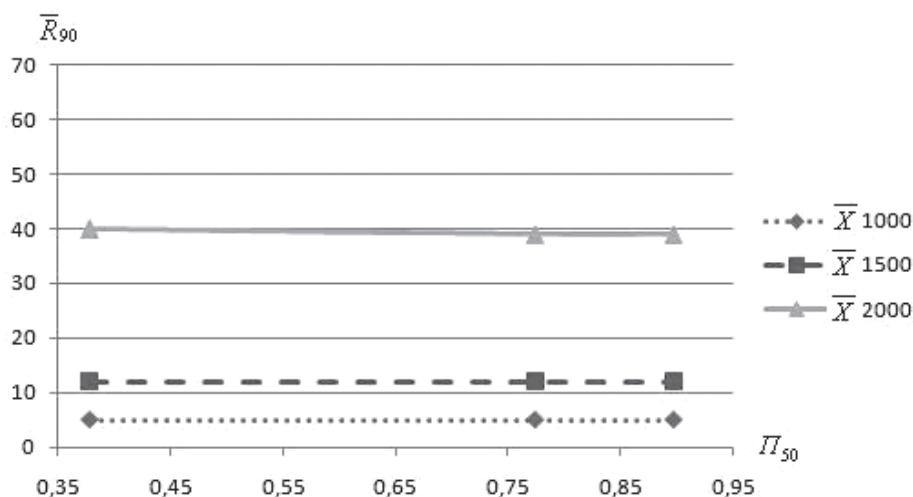


Рис. 10. Изменение безразмерного радиуса струи при $G_j = 20$ кг/с

Из графиков видно, что увеличение расхода в струе уменьшает влияние роста скорости впрыска жидкости в сопло.

Таким образом, уменьшение скорости впрыска жидкости позволяет при прочих равных условиях

увеличить дальность распространения двухфазной струи, однако с повышением расхода (масштаба системы) струя становится компактнее. Такой характер поведения струи объясняется тем, что повышение начальной скорости струи увеличивает турбу-

лентное взаимодействие струи с окружающей средой, которая, естественно, при данных условиях подтормаживает струю.

На рис. 11, 12 показаны результаты исследования влияния дисперсности на геометрию струи. Расчеты проводились для расхода $G_{ж} = 50$ кг/с при $\Pi_1 = 40$, $\Pi_{27} = 0,333$, $\Pi_{50} = 0,83$ и безразмерной длине сопла $\bar{l}_c = 10$. Зависимость скорости $\bar{w}_{жм}$ от критерия Π_6 для различных безразмерных сечений струи \bar{x} показана на рис. 11, а на рис.12 — зависимость \bar{R}_{90} от критерия Π_6 . Поскольку расходы и другие критерии не меняются при изменении критерия Π_6 , то увеличение этого критерия однозначно связано с ростом размера капель. Расчеты показали, что в исследованном диапазоне увеличение размера капель приводит к уменьшению дальности струи — снижается скорость на оси и увеличивается радиус струи.

Такое поведение струи связано, с одной стороны, при уменьшении размера капель с увеличени-

ем скорости струи (скорости потока на выходе из сопла), а с другой — с увеличением силы взаимодействия газа и капель, что также увеличивает эффект торможения.

Влияние массового расхода струи исследовалось при значениях $\Pi_1 = 40$, $\Pi_{27} = 0,2$, $\Pi_{50} = 0,17$ и безразмерной длине сопла $\bar{l}_c = 10$. На рис. 13 показана зависимость $\bar{w}_{жм}$ от относительного расхода жидкости

$$\bar{G}_ж = \frac{G_{ж}}{G_{ж\max}}, \quad (12)$$

где $G_{ж\max} = 140$ кг/с, а на рис. 14 приведена зависимость \bar{R}_{90} от относительного расхода $\bar{G}_ж$. Очевидно, что с увеличением расхода увеличивается дальность струи — растет скорость на оси, и уменьшается радиус струи.

Увеличение дальности в данном случае объясняется увеличением ядра струи при увеличении начального диаметра струи и, следовательно, ото-

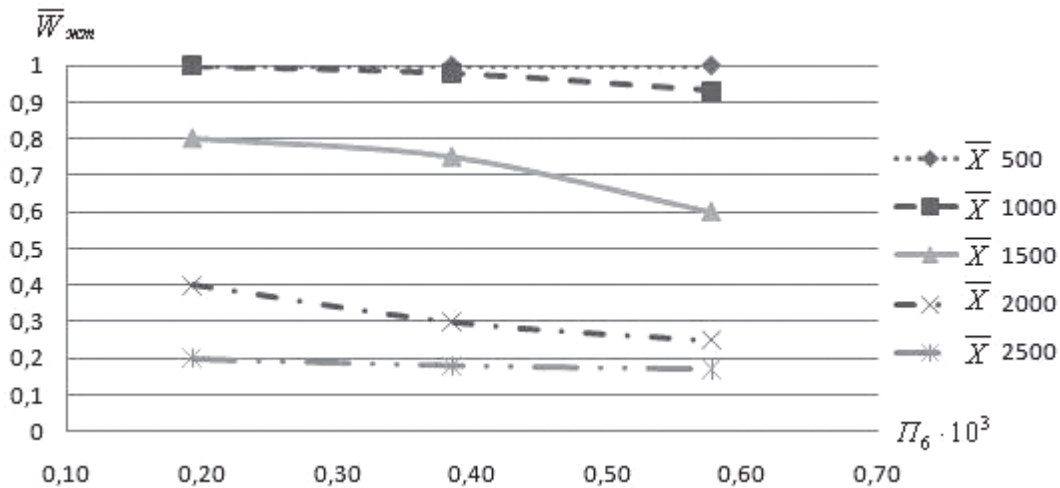


Рис. 11. Зависимость скорости $\bar{w}_{жм}$ от критерия Π_6

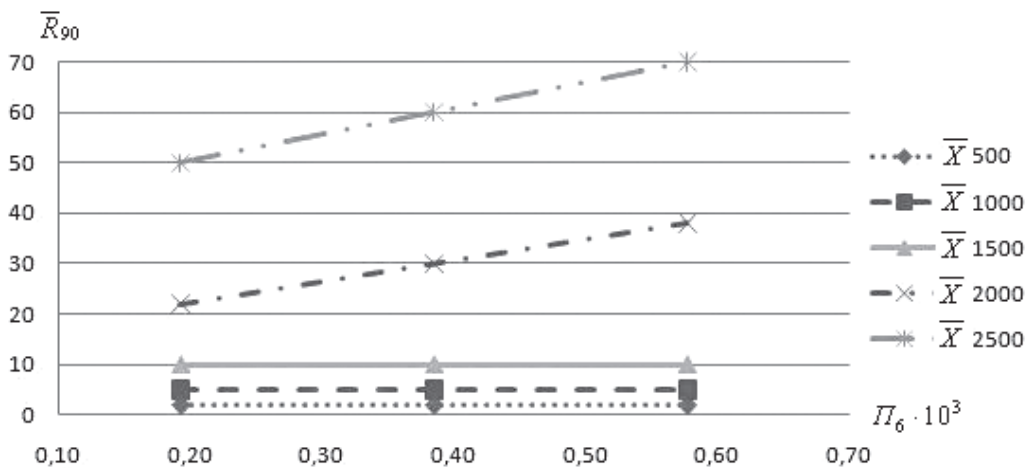


Рис. 12. Зависимость \bar{R}_{90} от критерия Π_6

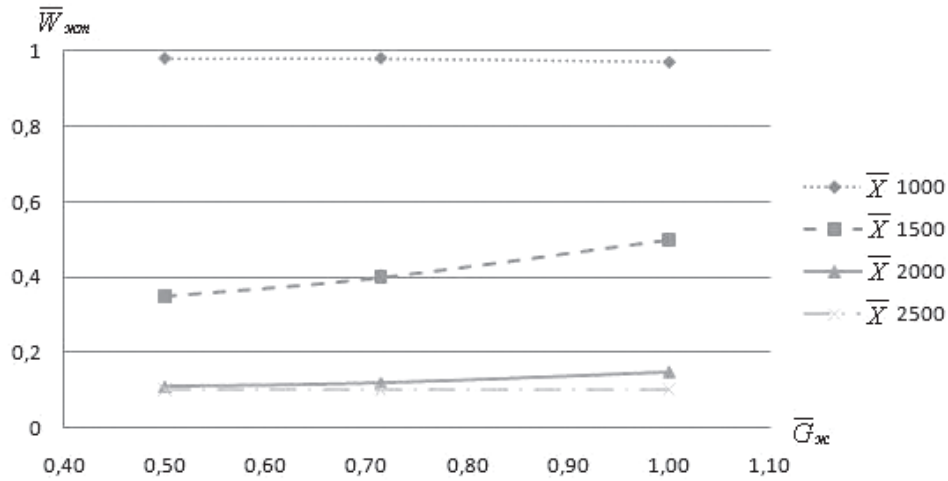


Рис. 13. Зависимость $\bar{W}_{жм}$ от относительного расхода жидкости

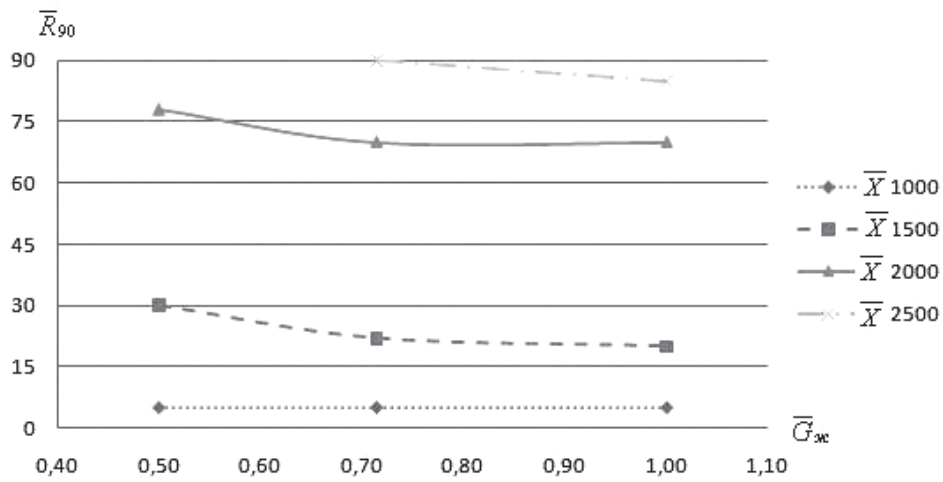


Рис. 14. Зависимость \bar{R}_{90} от относительного расхода жидкости

двиганием области основного участка дальше от начального сечения струи.

Оценка влияния массовой концентрации на геометрию струи представлена на рис. 15 и 16. Влияние массовой концентрации жидкости Π_1 исследовалось при значениях $\Pi_6 = 0,384 \cdot 10^{-3}$, $\Pi_{27} = 0,333$,

$\Pi_{50} = 0,83$ и безразмерной длине сопла $\bar{l}_c = 10$. Повышение массовой концентрации увеличивает дальность струи — растет скорость на оси $\bar{W}_{жм}$, и уменьшается радиус \bar{R}_{90} . Это увеличение дальности объясняется тем, что повышение концентрации конденсированной фазы в двухфазной струе подав-

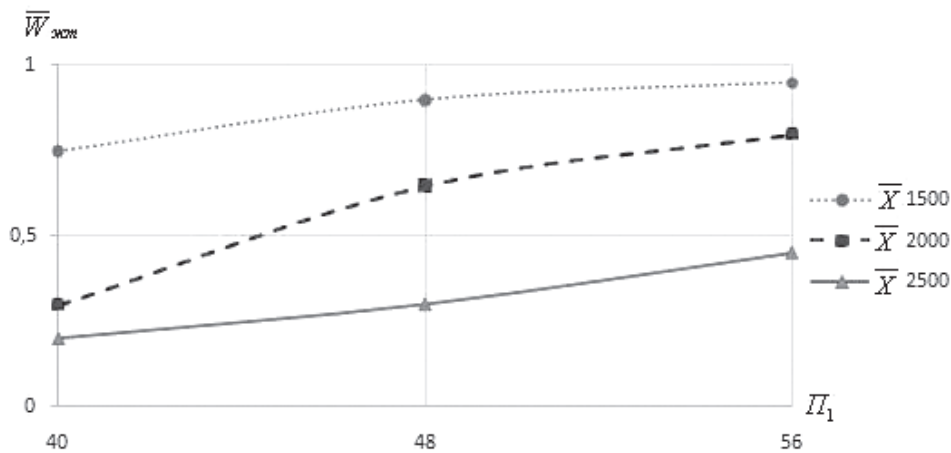


Рис. 15. Влияние массовой концентрации на безразмерную скорость струи

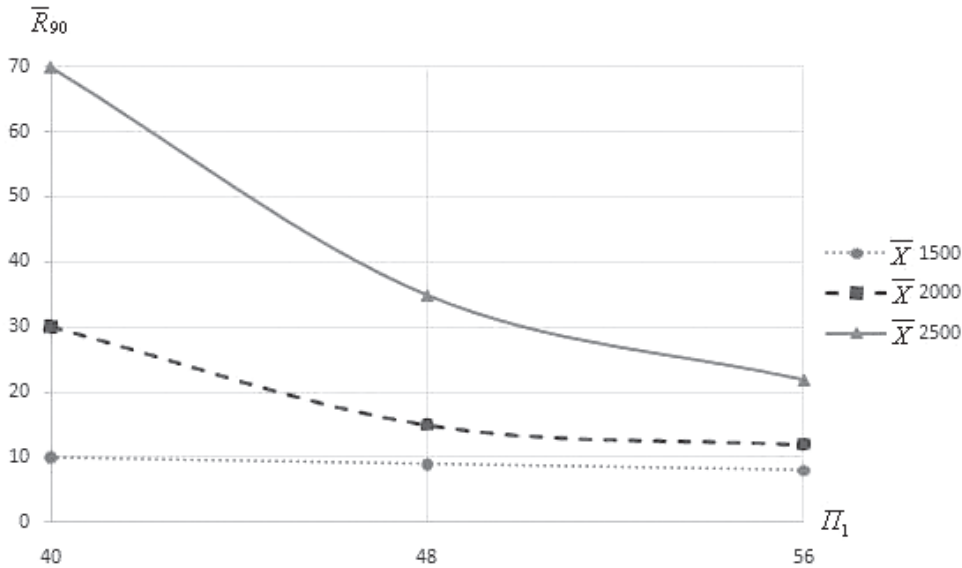


Рис. 16. Влияние массовой концентрации на геометрию струи

ляет турбулентность и, тем самым, ухудшает смешение. Поэтому дальность струи увеличивается.

В заключение рассмотрено влияние перепада давления на сопле, определяемое критерием Π_{27} . Сохранились постоянные значения $\Pi_1 = 40$, расход жидкости $G_{ж} = 140$ кг/с, размер капель $d_k = 100$ мкм, скорость жидкости на входе в сопло

$w_{c0} = 5$ м/с. Малая величина этой скорости позволяет примерно считать, что располагаемое значение скорости $w_{ж\text{расп}}$ (7) практически не зависит от w_{c0} , а зависит только от критерия Π_{27} . Уменьшение Π_{27} при постоянном значении давления на выходе связано с ростом давления на входе в сопло. Представленные на рис. 17 и 18 зависимости $\bar{w}_{жм}$ и \bar{R}_{90} от

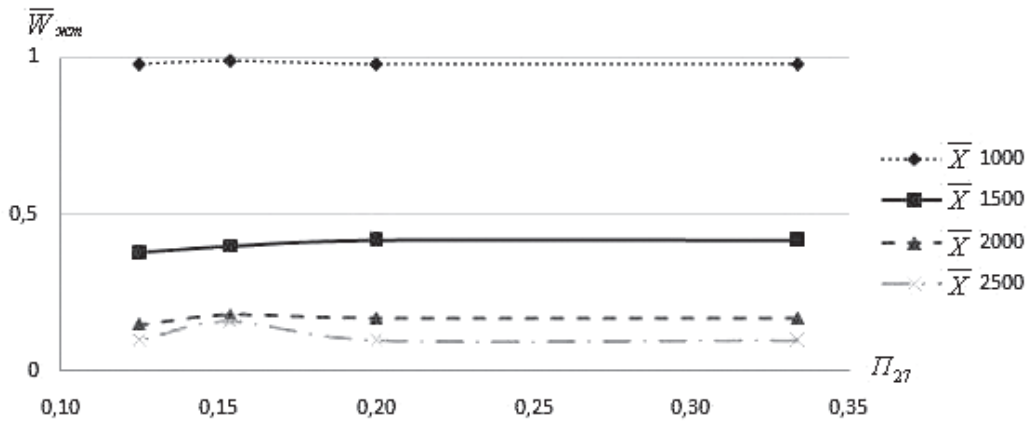


Рис. 17. Влияние параметра Π_{27} на безразмерную скорость струи

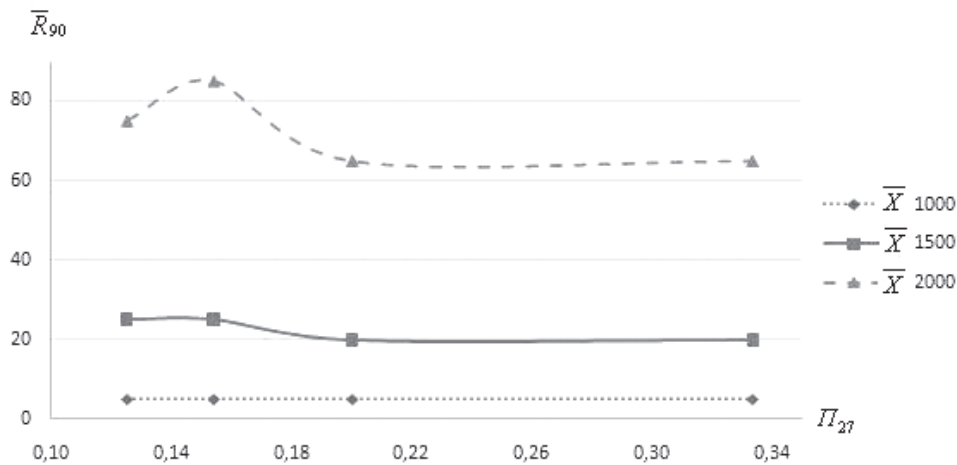


Рис. 18. Влияние параметра Π_{27} на геометрию струи

критерия P_{27} свидетельствуют о том, что увеличение давления (уменьшение P_{27}) несколько уменьшает дальность — безразмерную скорость $\bar{w}_{жм}$ и увеличивает безразмерный радиус \bar{R}_{90} . Как уже было отмечено выше, влияние критерия P_{27} в данном случае может быть объяснено изменением скорости струи на выходе.

Выводы

Впервые рассмотрено влияние системы «сопло—струя» на распространение двухфазной струи с помощью анализа ее геометрии. Полученные результаты позволяют управлять геометрией факела струи путем изменения ее энергетики и структуры, что необходимо для многих задач, где используется двухфазное рабочее тело, в частности в камерах сгорания, смесительных устройствах, эжекторах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части госзаказа №2014/92 проект 717.

Библиографический список

1. Зув Ю.В., Лепешинский И.А. Математическая модель двухфазной турбулентной струи // Механика жидкости и газа. 1981. №6. С. 44-54.
2. Зув Ю.В., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Истомин Е.А. Выбор критериев и определение их значений для оценки характера взаимодействия фаз в двухфазных турбулентных струях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. №1. С. 42-54.
3. Зув Ю.В., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Истомин Е.А. Особенности двухфазных струй с боль-

- шой концентрацией дисперсной фазы // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. №1. С. 129-142.
4. Зув Ю.В., Лепешинский И.А., Советов В.А., Чабанов В.А. Расчет пульсационных параметров фаз многофазной многокомпонентной неизотермической струи // Инженерно-физический журнал. Т.49. № 3. С. 503-504.
5. Абрамович Г.Н. О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи // Доклады Академии наук СССР. 1970. Т. 190. №5. С. 1052-1055.
6. Турбулентное смешение газовых струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. — М.: Наука, 1974. — 272 с.
7. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984. — 288 с.
8. Лепешинский И.А., Зув Ю.В., Яковлев А.А., Моlessон Г.В., Воронцов А.В., Онес В.И., Ципенко А.В. Численное и экспериментальное исследование газокпельного течения в сопле с большими концентрациями дисперсной фазы // Математическое моделирование. 2002. Т.14. №7. С. 121-127.
9. Лепешинский И.А., Бузов А.А., Федорова Н.М. Теоретическое исследование течения пароводяного двухфазного рабочего тела с учетом неравновесного межфазового взаимодействия // Вопросы газотермодинамики энергоустановок. Харьков: ХАИ, 1974. Вып. 1. С. 29-37.
10. Лепешинский И.А. Теоретическое исследование течения в сопле с двухфазным рабочим телом // Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. №3. С. 578-584.
11. Лепешинский И.А. Газодинамика одно-и двухфазных течений в реактивных двигателях. — М.: Изд-во МАИ, 2003. — 276 с.

BOUNDARY CONDITIONS EFFECT OF A NOZZLE-STREAM SYSTEM ON TWO-PHASE GAS-DROPLET STREAMS PROPAGATION

Lepeshinskii I.A. *, Antonovskii I.V. **, Guzenko A.A. *, Zuev Yu.V. ******

Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

** e-mail: igorlepeh@yandex.ru*

*** e-mail: antonovskij@mail.ru*

**** e-mail: a_guzenko_89@mail.ru*

***** e-mail: yuri_zuev@bk.ru*

Abstract

The paper presents the results of numerical study of boundary conditions effect of a nozzle-stream system on propagation and geometry of two-phase droplet streams in the form of non-dimensional parameters and main similarity criterion. The effect of critical parameters and

criteria is considerably associated with the system energetics and structure, as well as with its contribution to turbulence intensification and interphase interaction. We used the following values, characterizing both nozzle flow and stream flow, as basic similarity criteria

and non-dimensional parameters: relative phases concentration $\Pi_1 = G_1 / G_g$; relative density $\Pi_5 = Q_1 / Q_g$; relative drops size $\Pi_6 = d_n / d_{n0}$; relative pressure $\Pi_{27} = p_n / p_{n0}$; relative nozzle length in calibers $\bar{l}_n = l_n / d_{n0}$; relative stream length in calibers of the stream initial cross section diameter which is equal to nozzle exhaust diameter $\bar{x} = \frac{x}{l_1}$; relative liquid energetics, used in the nozzle $\bar{w}_{l\,disp} = w_{l0} / w_{l\,disp}$. We implemented relative speed on the axis $\bar{w}_{lm} = w_l / w_{l0}$ at three cross sections, placed at a distance of 1000, 2000 and 2500 calibers of the initial stream diameter, and relative stream radius $\bar{R}_{90\%}$, within which 90% of the stream liquid is concentrated, as stream variable geometry estimators. Here G is a mass flow; Q — density; d — diameter; p — pressure; w — speed; indices: “l” — liquid; “g” — gas; “n” — nozzle; “e” — environment parameters; “0” — parameters at the nozzle input; “disp” — disposable parameter value. The disposable value of speed is determined as

$$w_{l\,disp} = \sqrt{2 \frac{P_{n0} \left(1 + \frac{\rho_l w_{l0}^2}{P_{n0}} - \Pi_{27} \right)}{\rho_l}}$$

Particularly, pressure difference reduction, as well as increase of the size of drops, concentration of the condensed phase and mass flow in the investigated range of parameters increase the stream range of a two-phase stream. The stream herewith flows more compactly over more and more section of a stream. In case of the opposite change of the above-mentioned set of the parameters a decrease of stream range of a two-phase stream, improvement of mixing and increase of the stream radius at the same distances from the initial stream section occurs.

Keywords: gas, drops, two-phase flows, nozzles, gas-droplet streams, high drops concentration, stream geometry.

References

1. Zuev Yu.V., Lepeshinskii I.A. *Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1981, no. 6, pp. 44-54.
2. Zuev Yu.V., Lepeshinskii I.A., Reshetnikov V.A., Istomin E.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seria Mashinostroenie*, 2012, no. 1, pp. 42-54.
3. Zuev Yu.V., Lepeshinskii I.A., Reshetnikov V.A., Istomin E.A. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 129-142.
4. Zuev Yu.V., Lepeshinskii I.A., Sovetov V.A., Chabanov V.A. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, vol. 49, no. 3, pp. 503-504.
5. Abramovich G.N. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1970, vol. 190, no. 5, pp. 1052-1055.
6. Abramovich G.N. *Turbulentnoe smeshenie gazovykh strui* (Turbulent mixture of gas streams), Moscow, Nauka, 1974, 272 p.
7. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. *Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena* (Numerical modeling of heat- and mass exchange processes), Moscow, Nauka, 1984, 288 p.
8. Lepeshinskii I.A., Zuev Yu.V., Yakovlev A.A., Molesson G.V., Voronetskii A.V., Ones V.I., Tsipenko A.V. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2002, vol. 14, no. 7, pp. 121-127.
9. Lepeshinskii I.A., Buzov A.A., Fedorova N.M. *Voprosy gazotermodynamiki energoustanovok*, Khar'kov, KhAI, 1974, vol. 1, pp. 29-37.
10. Lepeshinskii I.A. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1974, vol. 12, no. 3, pp. 578-584.
11. Lepeshinskii I.A. *Gazodinamika odno-i dvukhfaznykh techenii v reaktivnykh dvigatelyakh* (Gas dynamics of single — and two-phase currents in jet engines), Moscow, MAI, 2003, 276 p.