DOI: 10.15593/2224-9982/2020.60.10

УДК 621.694.2: 621.452

С.С. Картас, В.И. Панченко, Ю.Б. Александров

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТНОГО ЭЖЕКТОРА С КРИВОЛИНЕЙНЫМ НАЧАЛЬНЫМ УЧАСТКОМ КАМЕРЫ СМЕШЕНИЯ И С ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

Приводятся результаты численного моделирования и экспериментального исследования жидкость-жидкостного эжектора с криволинейным начальным участком камеры смешения. Экспериментальное исследование проведено на жидкость-жидкостных эжекторах, модели которых изготовлены на 3D-принтере методом послойного наплавления. Оценивается влияние возможных погрешностей изготовления эжектора на его характеристики. Рассмотрены вопросы применения жидкостных эжекторов, предназначенных для работы в области различных заранее заданных коэффициентов эжекции. Определены теоретический коэффициент эжекции и причины снижения коэффициента эжекции в реальных эжекторах. Полученные зависимости позволяют определить оптимальные конструктивные параметры жидкостного эжектора и тем самым повысить его коэффициент эжекции. Показан относительный перепад значений давления при низком и высоком коэффициентах эжекции. Приведены расчетные и экспериментальные результаты определения коэффициента эжекции для жидкостных эжекторов, которые имеют широкое применение в различных областях техники. Приводятся результаты численного моделирования внутренних процессов, протекающих в однофазном жидкость-жидкостном эжекторе, в пакете прикладных программ гидрогазодинамики ANSYS-Fluent на основе исследования малоразмерной модели. В результате моделирования получено хорошее совпадение результатов расчета модели, соответствующей реальному прототипу, с экспериментальными данными и сравнение с результатами других авторов. Из результатов исследования можно сделать несколько выводов. Например, обнаружена область значений коэффициента эжекции, в которой относительный перепад значений давления, создаваемый эжектором, увеличивается при увеличении коэффициента эжекции.

Ключевые слова: эжектор, жидкость, камера смешения, криволинейный участок камеры смешения, прямолинейный участок, коэффициент эжекции, диффузор, характеристика, численный расчет, экспериментальное исследование.

S.S. Kartas, V.I. Panchenko, Yu.B. Aleksandrov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI,
Kazan, Russian Federation

NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF A LIQUID-LIQUID EJECTORS WITH A CURVED INITIAL MIXING CHAMBER AREA AND WITH DIRECT MIXING CAMERA

The article presents the results of numerical simulations and experimental studies of a liquid-liquid ejector with a curved initial portion of the mixing chamber. The experiment was conducted on liquid-liquid ejectors, models of which are made on a 3D printer, by the method of layer-by-layer deposition. The influence of possible manufacturing errors of the ejector on its characteristics is estimated. The issues of the use of liquid ejectors designed to work in the field of various predetermined ejection coefficients are considered. The theoretical ejection coefficient and the reasons for reducing the ejection coefficient in real ejectors are determined. The obtained dependences make it possible to determine the optimal design parameters of a liquid ejector and thereby increase its ejection coefficient. The relative pressure drop is shown at a low coefficient and at a high ejection coefficient. The calculated and experimental results of determining the ejection coefficient for liquid ejectors, which are widely used in various fields of technology, are presented. The results of numerical simulation of internal processes in the ANSYS-Fluent hydro-gasdynamic application package flowing in a single-phase liquid-liquid ejector based on the study of a small-sized model are presented. As a result of the simulation, a good agreement was obtained between the calculation results of the model corresponding to the real prototype and the experimental data and comparison with the results of other authors. Several conclusions can be drawn from the results of the study. For example, a region of values of the ejection coefficient was found in which the relative pressure drop created by the ejector increases with an increase in the ejection coefficient.

Keywords: ejector, liquid, mixing chamber, curved section of the mixing chamber, straight section, ejection coefficient, diffuser, characteristic, numerical calculation, experimental study.

Струйными называются аппараты, в которых происходит смешение и обмен энергиями потоков разных давлений с образованием смешанного потока с промежуточным давлением. В пароводяных инжекторах давление смешанного потока может превышать давление рабочего потока [1].

Для испытания реактивных двигателей используется эжектор. Струя выхлопных газов, вытекающая из реактивного сопла, подсасывает в эжектор воздух из шахты, обеспечивая тем самым вентиляцию помещения и охлаждение двигателя [2]. Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии является основным, принципиальным качеством струйных аппаратов. Благодаря этому качеству использование струйных аппаратов во многих отраслях техники позволяет получать более простые и надежные технические решения по сравнению с применением механических нагнетателей (компрессоры, насосы, газодувки, вентиляторы и др.) [3]. Во всем мире непрерывно проводятся исследования, посвященные совершенствованию рабочего процесса эжектора. Обзор литературы показал, что КПД эжектора с жидкой активной струей можно повысить дополнительным воздействием на струю активного потока или на пассивную газовую среду, увлекаемую жидкой струей [4]. За последние 60 лет с целью увеличения тяги двигателя, уменьшения расхода топлива, снижения шума реактивной струи, уменьшения выходной температуры и так далее было выполнено много исследований эжекторов в составе реактивных двигателей [5–8]. Струйные эжекторы в силу надежности и простоты конструкции широко используют в энергетике, аэрокосмической, нефтегазовой и химической отраслях промышленности [9–11].

С целью повышения эффективности различных устройств, исследованию которых посвящен ряд работ, в технике широко применяют криволинейное течение. В настоящей работе исследован жидкостной эжектор.

Эффективный жидкостной эжектор – это смеситель жидкостей, отличительным признаком которого является применение криволинейного входного участка камеры смешения [12–14], обеспечивающего уменьшение потерь

давления в эжекторе за счет снижения средней скорости активного потока. Входной криволинейный участок камеры смешения обеспечивает перераспределение скорости по закону свободного вихря, при этом максимальное значение скорости в активном потоке обеспечивается у сопла низконапорного (пассивного) потока. Благодаря большей скорости на срезе пассивного потока происходит эжектирование большего количества низконапорной жидкости по сравнению с эжектором с прямолинейной камерой смешения при прочих равных условиях [12, 15].

Как уже отмечалось в обзорной части монографии [10], существует большое число работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям жидкостных эжекторов с цилиндрической камерой смешения. Эти исследования достаточно интенсивно проводились как в нашей стране, так и за рубежом начиная с 20-х гг. прошлого столетия. Среди множества литературных источников по эжекторной тематике имеется лишь несколько в какой-то мере основополагающих работ, остальные, будучи идентичными в исходных положениях, отличаются описанием отдельных особенностей процессов, происходящих в эжекторах [10].

В качестве вариантов таких эжекторов можно предложить использование криволинейного участка камеры смешения, которая позволяет улучшить параметры эжектора [13].

В настоящей работе приведены результаты исследования криволинейного и прямолинейного эжекторов. Фотография и функциональная схема установки приведены на рис. 1 и 2. Установка работала на потоках одной фазы; рабочий и пассивный потоки – жидкость (вода).

Эжектор представлял собой прямоугольный канал, напечатанный с помощью FMD-печати, с боковыми стенками из прозрачного оргстекла для наблюдения за течением и смешением жидкостей.

Все элементы системы соединялись между собой силиконовыми шлангами. Для измерения расхода жидкости были использованы датчики расхода жидкости на основе эффекта Холла. Принцип действия датчика заключается в получении импульсов от микросхемы 460s при вращении турбинного колеса

Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования жидкость-жидкостного эжектора

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования эжектора:
1 – бак с водой; 2 – эжектор; 3 – расходомер; 4 – кран; 5 – крестовина;
6 – пьезометрический щит; 7 – шланг; 8 – насос; 9 – микроконтроллер с экраном;
10 – регулятор мощности; 11 – блок питания; 12 – электрическая сеть

с закрепленным на оси вращения магнитом кольцевой формы. Турбинное колесо приводится в движение потоком воды. Когда южный полюс магнита направлен в сторону микросхемы, выходной сигнал низкий, а когда северный полюс магнита повернут к микросхеме, то на микроконтроллер подается высокий сигнал. По количеству импульсов во времени определяется расход. Рабочий диапазон такого датчика от 1 до 30 л/мин. Для более низких расходов использовались аналогичные по принципу действия расходомеры с начальным значением измеряемого расхода от 0,3 л/мин. Все рабочие зависимости расхода жидкости от количества импульсов датчика были получены путем объемного тарирования мензуркой. Датчики были установлены горизонтально и закреплены для исключения отклонения оси вращения турбинного колеса от вертикали. Погрешности,

получаемые датчиками в широком диапазоне расходов, не превышали 2 %. Воспроизводимость результатов измерения расхода в ходе тарирования датчиков была очень высокая.

В характерных сечениях эжектора были выполнены штуцеры для подключения пьезометрических трубок.

На рис. 3–6 показаны фотографии и схемы криволинейного и прямолинейного эжекторов.

Численный расчет проводился в стационарной постановке с использованием программы Fluent и моделей турбулентной вязкости $k-\epsilon$ RNG [16]. Сеточные модели выбирались на основе расчетов и анализа сеточной независимости получаемых результатов. Численные расчеты были выполнены в трехмерной постановке с использованием моделей турбулентной вязкости $k-\epsilon$ RNG и сопоставлены с экспериментальными данными [16].

Рис. 3. Экспериментальный криволинейный эжектор

Рис. 4. Схема криволинейного эжектора: 1 – сопло высоконапорного потока; 2 – сопло низконапорного потока; 3 – начальный участок камеры смешения; 4 – прямолинейный участок камеры смешения; 5 – диффузор

Рис. 5. Экспериментальный прямолинейный эжектор

Рис. 6. Схема прямолинейного эжектора: 1 – сопло высоконапорного потока; 2 – сопло низконапорного потока; 3 – прямолинейный участок камеры смешения; 4 – диффузор

Коэффициент эжекции $n = \frac{G_2}{G_1}$ – это от-

носительный расход жидкости, который зависит от значений площади сопел, плотности и начального давления жидкостей, а также режима работы эжектора [17].

В настоящей работе представлены (рис. 7–10) результаты численного расчета и эксперимента характеристики $\left(\frac{P_4^* - P_2^*}{P_1^* - P_2^*} = f(n)\right)$

криволинейного и прямолинейного эжекторов при одинаковых геометрических $\alpha = F_1/F_2$ характеристиках, представлявших собой отношения значений площади сопел высоконапорной и низконапорной жидкостей. Как видно из рис. 9, при одинаковых коэффициентах эжекции относительный перепад получается больше у криволинейного эжектора. Ввиду этого эжекторы с криволинейной камерой смешения часто являются более эффективными.

Рис. 7. Поле давления в криволинейном эжекторе при $\alpha = F_1/F_2 = 0,2$; $\frac{P_4^* - P_2^*}{P_1^* - P_2^*} = 0,053$ и $n = \frac{G_2}{G_1} = 1$

Рис. 8. Поле давления в прямолинейном эжекторе при $\alpha = F_1/F_2 = 0,2$; $\frac{P_4^* - P_2^*}{P_1^* - P_2^*} = 0,022$ и $n = \frac{G_2}{G_1} = 1$

Рис. 9. Сравнение характеристик эжекторов $\alpha = F_1/F_2 = 0,2$:

a – относительный перепад давлений при $0 \leq n \leq 1,2$; b – при $0 \leq n \leq 0,2$ (крупный масштаб);

- эксперимент для криволинейного; – • – расчет для криволинейного;
- эксперимент для прямолинейного;■..... расчет для прямолинейного

Рис. 10. Сравнение характеристик эжекторов $\alpha = F_1/F_2 = 0,2$, $l/a = 6,0$:

— • — — эксперимент для криволинейного,
 — эксперимент для прямолинейного,
 - - - — эксперимент для прямолинейного [6]

Рис. 11. Сравнение характеристик эжекторов $\alpha = F_1/F_2 = 0,5$:

— • — — эксперимент для криволинейного [14],
 - - - — расчет для криволинейного,
 - - - — эксперимент для прямолинейного [14],
 — расчет для прямолинейного

Как видно из рис. 10, относительный перепад давлений получается больше в проведенном эксперименте при коэффициенте эжекции от 0 до 0,4, по сравнению с другими экспериментами.

На рис. 11 приведены результаты численного расчета для $\alpha = F_1/F_2 = 0,5$ (криволинейный участок камеры смешения отвод и колено).

Как видно из рис. 11, относительный перепад давлений зависит от отношения $\alpha = F_1/F_2$: чем оно больше, тем больше относительный перепад давления.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. При низких коэффициентах эжекции относительный перепад давления при

$\alpha = F_1/F_2 = 0,2$ повышается до коэффициента эжекции 0,05, затем уменьшается.

2. Относительный перепад давлений получается больше в представленном в настоящей работе эксперименте, в области коэффициента эжекции от 0 до 0,4.

3. При одинаковых коэффициентах эжекции относительный перепад давлений у криволинейного эжектора больше, чем у прямолинейного. Ввиду этого эжекторы с криволинейным участком камеры смешения часто являются более эффективными.

4. Относительный перепад давлений зависит от отношения площади $\alpha = F_1/F_2$: чем больше это отношение, тем больше относительный перепад давлений.

Библиографический список

1. Аркадов Ю.К. Новые газовые эжекторы и инжекционные процессы. — М., 2001. — 337 с.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976. — 888 с.
3. Турбулентное смешение газовых струй / Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.Н. Секундов, И.П. Смирнова. — М.: Наука, 1974. — 272 с.
4. Исмагилов А.Р., Спиридонов Е.К., Белкина О.В. О повышении эффективности эжектора с жидкой струей // Пром-Инжиниринг: 3-я Междунар. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 16–19 мая 2017 г. — СПб., 2017. — С. 13–17.
5. Георг Я., Штаудахер С., Фалалеев С.В. Моделирование эжектора для газотурбинных двигателей с применением пакета программ для расчета их характеристик // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. — 2011. — № 3 (27). — С. 337–344.
6. Панченко В.И., Бикбулатов Р.Р. Расчет идеального увеличителя тяги // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2012. — № 1. — С. 36–40.
7. Сыченков В.А., Панченко В.И., Халиуллин Р.Р. Исследование коаксиального газового эжектора // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2014. — № 2. — С. 24–28.
8. Халиуллин Р.Р., Сыченков В.А., Панченко В.И. Разработка методики расчета эжекторов с малыми коэффициентами эжекции // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2018. — № 1. — С. 65–71.

9. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
10. Александров В.Ю., Климовский К.К. Оптимальные эжекторы (теория и расчет). – М.: Машиностроение, 2012. – 135 с.
11. Ласуков И.С. Исследование работы водо-водяного эжектора // Перспективы развития фундаментальных наук: XI Междунар. конф. студентов и молодых ученых, 22–25 апреля 2017 г., г. Томск. – Томск, 2014. – С. 612–614.
12. Эжектор: пат. 119417 Рос. Федерация: МПК F04F5/30 / Сыченков В.А., Панченко В.И., Халиуллин Р.Р. [и др.]; заяв. и патентообл. ООО «Научно-внедренческая фирма “Спектр”». – № 2012112780/06; заявл. 02.04.2012; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 2 с.
13. Газовый и паровой эжекторы с криволинейной осью системы: пат. 627743 СССР // Васильев Ю.И. – заявл. 11.05.1959; опубл. 01.01.1959. – 4 с.
14. Халиуллин Р.Р. Повышение эффективности энергетических ГТУ с применением эжекторных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. – Казань, 2018. – 136 с.
15. Картас С.С., Панченко В.И., Александров Ю.Б. Влияние геометрических параметров эжектора с криволинейным участком камеры смещения на его характеристику // Вестник Моск. авиац. ин-та. – 2019. – № 4. – С. 166–172.
16. Картас С.С., Панченко В.И., Александров Ю.Б. Выбор модели турбулентной вязкости для численного расчета эжектора с криволинейным участком камеры смещения // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2019. – № 4. – С. 87–90.
17. Картас С.С., Панченко В.И., Александров Ю.Б. Сравнение характеристик криволинейного и прямолинейного эжекторов // XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых): междунар. молодеж. науч. конф., г. Казань, 7–8 ноября 2019 г.: в 6 т. – Казань: Изд-во ИП А.Р. Сагиева, 2019. – С. 226–228.

References

1. Arkadov Yu.K. Novyye gazovyye ezhektory i inzhetsionnyye protsessy [New gas ejectors and injection processes]. Moscow, 2001, 337 p.
2. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1976, 888 p.
3. Abramovich G.N., Krashenninnikov S.Yu., Sekundov A.N., Smirnova I.P. Turbulentnoye smesheniye gazovykh struy [Turbulent mixing of gas jets]. Moscow: Nauka, 1974, 272 p.
4. Ismagilov A.R., Spiridonov E.K., Belkina O.V. O povyshenii effektivnosti ezhektora s zhidkoy struyey [On increasing the efficiency of a liquid jet ejector]. 3rd International Scientific and Technical Conference "Prom-Engineering", 2017, pp. 13-17.
5. Georg Ya., Shtauckher S., Falaleyev S.V. Modelirovaniye ezhektora dlya gazoturbinnnykh dvigateley s primeneniyyem paketa programm dlya rascheta ikh kharakteristik [Simulation of an ejector for gas turbine engines using a software package for calculating their characteristics]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2011, Vol. 3 (27), pp. 337-344.
6. Panchenko V.I., Bikbulatov R.R. Raschet idealnogo uvelichitelya tyagi [Calculation of the ideal traction magnifier]. Russian Aeronautics, 2012, Vol. 1, pp. 36-40.
7. Sychenkov V.A., Panchenko V.I., KHALIULIN R.R. Issledovaniye koaksialnogo gazovogo ezhektora [Investigation of a coaxial gas ejector]. Russian Aeronautics, 2014, Vol. 2, pp. 24-28.
8. KHALIULIN R.R., Sychenkov V.A., Panchenko V.I. Razrabotka metodiki rascheta ezhektorov s malymi koeffitsiyentami ezhektzii [Development of a method for calculating ejectors with small ejection coefficients]. Russian Aeronautics, 2018, no. 1, pp. 65-71.
9. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struynyye apparaty [Jet ejectors]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 352 p.
10. Aleksandrov V.Yu. Klimovskiy K.K. Optimalnyy ezhektory (teoriya i raschet) [Optimal ejectors (theory and calculation)]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2012, 135 p.
11. Lasukov I.S. Issledovaniye raboty vodo-vodyanogo ezhektora [The study of the water-water ejector]. 5th International Conference of Students and Young Scientists "Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk", 2014, pp. 612-614.
12. Patent 119417 Russian Federation, IPC F04F5 / 30. Ejector. Sychenkov V.A., Panchenko V.I., KHALIULIN R.R. and etc. Applicant and patent holder Limited liability company – Research and development company "Spektr", No. 2012112780/06; declared 04/02/2012; publ. 08/20/2012, Bull. No. 23, 2 p.
13. Vasilyev Yu.I. Gazovyy i parovoy ezhektory s krivolineynoy osyu sistemy [Gas and steam ejector with a curvilinear axis system]. Application 627743, 11.05.1959, published 01.01.1959 in the register of inventions and discoveries under the Council of Ministers of the USSR, 4 p.

14. Khaliulin R.R. Povysheniye effektivnosti energeticheskikh GTU s primeneniye ezhektornykh sistem [Improving the efficiency of energy gas-turbine units using ejector systems: thesis for the degree of PhD in Technical Sciences]. Kazan National Research Technical University named after A N Tupolev – KAI, Kazan, 2018, 136 p.

15. Kartas S.S., Panchenko V.I., Aleksandrov Yu.B. Vliyaniye geometricheskikh parametrov ezhektora s krivolineynym uchastkom kamery smesheniya na ego kharakteristiku [The influence of the geometric parameters of the ejector with a curved portion of the mixing chamber on its characteristic]. Aerospace MAI journal, 2019, No. 4, pp. 166-172.

16. Kartas S.S., Panchenko V.I., Aleksandrov Yu.B. Vybora modeli turbulentnoy vyazkosti dlya chislennogo rascheta ezhektora s krivolineynym uchastkom kamery smesheniya [Choice of a turbulent viscosity model for the numerical calculation of an ejector with a curved portion of the displacement chamber]. Russian Aeronautics, 2019, no. 4, pp. 87-90.

17. Kartas S.S., Panchenko V.I., Aleksandrov Yu.B. Sravneniye kharakteristik krivolineynogo i pryamolineynogo ezhektorov [Comparison of the characteristics of curved and rectilinear ejectors]. XXIII Tupolev Readings (School of Young Scientists): International Youth Science Conference, November 7-8, 2019: Conference proceedings. Collection of reports: in 6 vol.; Vol. 1, Kazan: Publishing House of IP Sagiev A.R., 2019, pp. 226-228.

Об авторах

Картас Салар Сабер (Казань, Россия) – аспирант кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: salar.saber@mail.ru).

Панченко Владимир Иванович (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: panchenkovi@rambler.ru).

Александров Юрий Борисович (Казань, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: Alexwischen@rambler.ru).

About the authors

Salar S. Kartas (Kazan, Russian Federation) – PhD Student of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: salar.saber@mail.ru).

Vladimir I. Panchenko (Kazan, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: panchenkovi@rambler.ru).

Yury B. Aleksandrov (Kazan, Russian Federation) – CSc in Chemistry Sciences, Associate Professor of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: Alexwischen@rambler.ru).

Получено 06.03.2020