

УДК 621.527.4 + 621.51 + 621.69 + 621.175

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS FLUENT

А.Р. Исмагилов, Д.Р. Исмагилов

Описан рабочий процесс жидкостно-газового эжектора с позиций компьютерного моделирования. С помощью программного комплекса Ansys Fluent разработана и описана математическая модель эжектора, позволяющая спрогнозировать физические процессы, протекающие внутри аппарата. Полученные результаты позволили определить предпочтительную длину рабочей камеры.

Ключевые слова: эжектор, длина рабочей камеры, прыжок перемешивания, CFD, Ansys Fluent, компьютерное моделирование.

Компьютерное моделирование позволяет спрофилировать проточную часть жидкостно-газового эжектора (ЖГЭ) и значительно сэкономить время и средства на дорогостоящий натуральный эксперимент [1]. Рабочий процесс, протекающий в эжекторе, является гидродинамически сложным, включающим различные стадии протекания. Необходимо рассматривать такие процессы, как формирование высокоскоростной жидкостной струи активного потока, дальнейшее увеличение низконапорной пассивной газовой среды за счет сил трения, смешение жидкости и газа, возникновение прыжка перемешивания, преобразование части кинетической энергии в потенциальную [2].

Существующие методики расчета [3–8] позволяют рассчитать предпочтительные геометрические размеры аппарата, при которых достигается режим работы с минимальными затратами рабочей среды и энергии. Так, R.G. Cunningham и R.J. Dopkin в своих исследованиях отметили влияние формы отверстия сопла на оптимальную длину смесительной камеры [3]. J.H. Witte первым предложил увеличить число струй ($N = 19$) и относительную длину рабочей камеры, превышающей длину обычных эжекторов в 3 раза ($l = 20 \dots 22$) [4]. Исследования R.G. Cunningham [3], Ю.Н. Васильева и Е.П. Гладкова [5] и др. подтвердили тот факт, что при расположении прыжка перемешивания на выходе из рабочей камеры перед диффузором КПД эжектора будет максимальным. Г.И. Ефимочкин, Б.Е. Кореннов и Л.Д. Берман обнаружили, что потребная длина рабочей камеры l у эжекторов существенно превышает длину смесительной камеры, характерной для струйных насосов с равноплотными средами [6, 7]. Е.К. Спиридонов на основе анализа длины распада свободной струи вывел формулу для нахождения потребной длины камеры смешения l , приравняв ее к длине распада струи [8].

На длину перемешивания потоков влияют такие факторы, как объемное газосодержание жидкостно-газовой смеси, расходы газа и жидкости; скорость пассивной газовой среды на входе в рабочую камеру, наличие прыжка перемешивания, форма и размеры проточного канала. При отсутствии аналитических выражений зачастую приходят на помощь опытные данные со схожими условиями работы эжектора [6, 7]. Наличие приближенных формул и экспериментальных данных в совокупности позволяют предсказать предпочтительную длину рабочей камеры, однако такой подход будет целесообразным лишь для ограниченного диапазона рабочих параметров.

Компьютерное моделирование позволяет учесть все вышеотмеченные факторы и определить оптимальную длину камеры смешения. Настоящая статья посвящена описанию создания 2D осесимметричной модели эжектора в программном комплексе Ansys Fluent (исследования выполнены с использованием суперкомпьютерных ресурсов ЮУрГУ [9]).

Основные элементы эжектора, такие как сопло, приемная камера, конфузор, рабочая камера и диффузор, представляют собой тела вращения, поэтому решение задачи проводилось в плоской осесимметричной постановке, что позволяет существенно снизить количество расчетных элементов и, соответственно, сэкономить вычислительные ресурсы. На рис. 1 приведена геометрическая модель эжектора, созданная в сеточном генераторе Ansys ICEM CFD. Рассматривались две модели с различными длинами рабочей камеры: $l = 300$ мм и $l = 400$ мм.

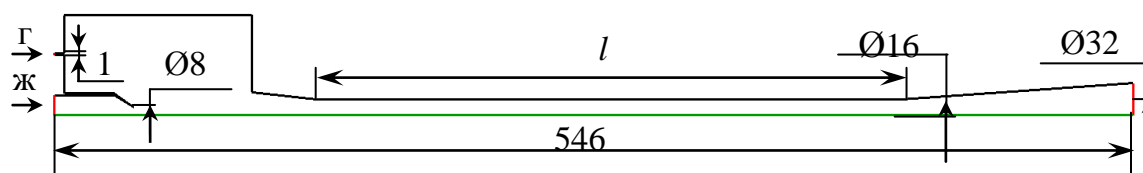


Рис. 1. Геометрическая модель эжектора (г – газ; ж – жидкость)

С помощью сеточного генератора Ansys ICEM CFD сгенерирована структурированная сеточная модель, состоящая из 14046 прямоугольных расчетных элементов. Такая сеточная модель, в отличие от треугольной (в плоской постановке), позволяет снизить численную диффузию потока жидкостно-газовой смеси, а также является предпочтительной с точки зрения затрат памяти компьютера и времени вычислительного процесса. Вблизи пристеночных областей соплового устройства 1, конфузора 2, рабочей камеры 3 и диффузора 4, приведенных на рис. 2, применялось сгущение сетки по экспоненциальному закону с целью удовлетворения рекомендуемых условий по значению величины y^+ для используемой модели турбулентности k- ϵ [10].

Программный комплекс численного моделирования Ansys Fluent позволяет использовать при расчете несколько моделей многофазных потоков: модель свободной поверхности VOF (volume of fluid), модель Эйлера

(Eulerian model) и модель смеси (Mixture model). В эжекторе рабочий процесс перемешивания характеризуется изменением моделей многофазных потоков вдоль проточной части. На рис. 3 схематично изображено последовательное расположение участков течения активной и пассивной среды, для которых характерны различные модели многофазных потоков.

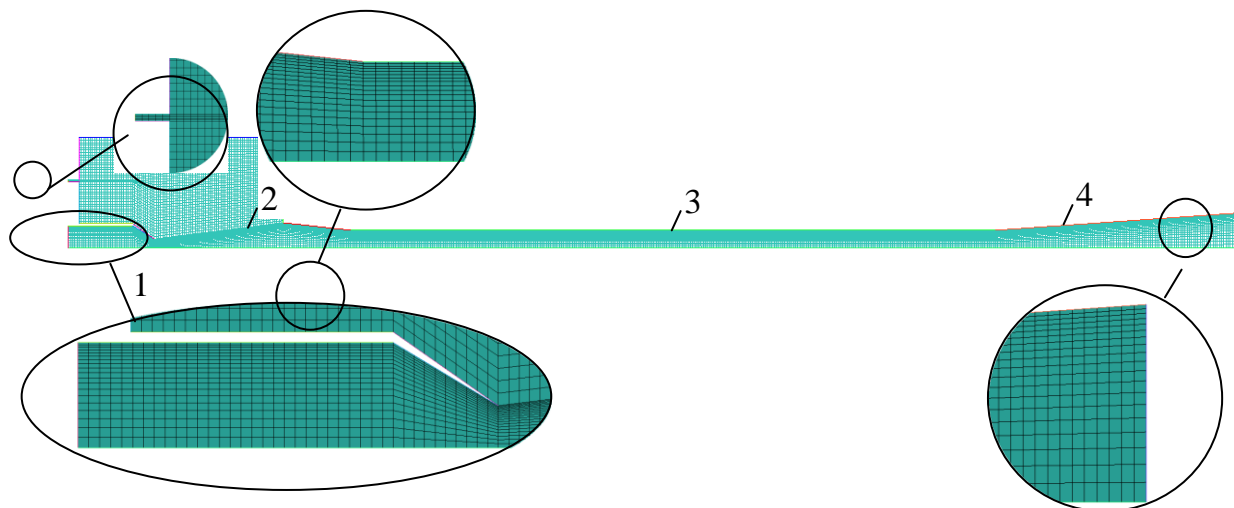


Рис. 2. Сеточная модель для эжектора

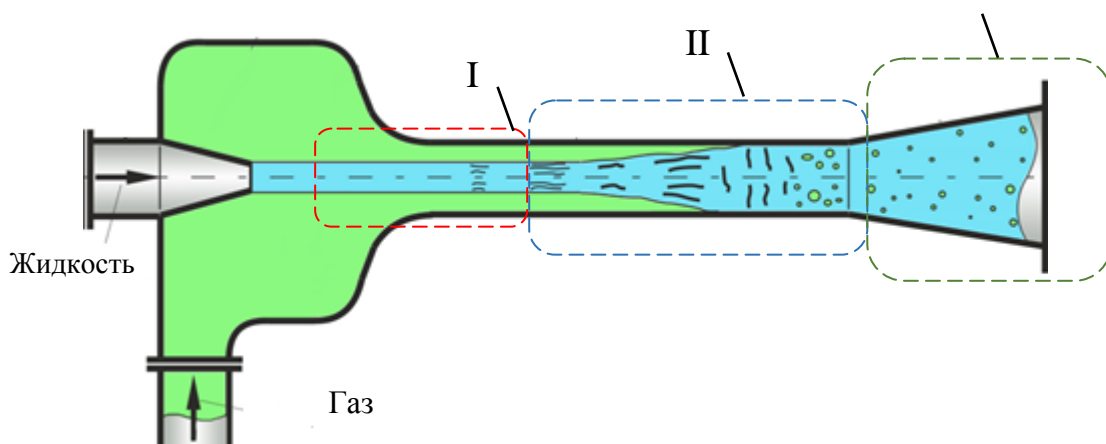


Рис. 3. Устройство и принцип работы ЖГЭ

Так, на участке I высокоскоростная струя жидкости устремляется в рабочую камеру и увлекает за собой газовую среду. Потoki имеют устойчивую границу раздела фаз. В этом случае течение описывается моделью свободной поверхности. В модели VOF используются уравнения количества движения для каждой фазы и по всей области отслеживается объемная доля каждой фазы. На II участке происходит распад струи на капли, которые обмениваются количеством движения с газовой средой. Дискретной средой является жидкость, а сплошной – газ. Участок II завершается заполнением жидкостью всего поперечного сечения рабочей камеры. Мно-

гофазное течение на участке II целесообразно описывать моделью Эйлера. В данной модели отдельно для каждой фазы решаются законы сохранения массы, количества движения и энергии. На III участке структура потока является практически однородной. При этом дискретной средой является газ в виде пузырей, а сплошной средой – жидкость. На участке III течение описывается моделью смеси. В модели смеси используются законы сохранения для смеси жидкости и газа.

Поскольку программа Ansys Fluent позволяет использовать при расчете лишь одну модель многофазного потока, то выберем ту модель, которая позволяет учесть как рабочие параметры отдельных фаз, так и смеси. Для этого воспользуемся моделью смеси, которая описывается уравнениями неразрывности и количества движения [11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m \cdot \vec{U}_m) = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \cdot \vec{U}_m) + \nabla(\rho_m \cdot \vec{U}_m \cdot \vec{U}_m) = \\ & = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_m \left(\nabla \vec{U}_m + \nabla \vec{U}_m^T \right) \right] + \rho_m \cdot \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{U}_{dr,k} \vec{U}_{dr,k} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_m – плотность смеси, кг/м³; U_m – скорость смеси, м/с; ∇ – вектор-оператор; μ_m – динамическая вязкость смеси, кг/(м·с); T – индекс турбулентности; g – ускорение свободного падения, м/с²; F – сила тяжести, Н; n – количество фазовых состояний сред; α_k – объемное газосодержание фазы k ; $U_{dr,k}$ – скорость сдвига фазы k , м/с.

В моделях учитывался эффект гравитации на течение рабочих сред сверху вниз. Воздух рассматривался как несжимаемый идеальный газ. Модель турбулентности – k - ϵ , позволяющая учитывать процессы сложных сдвиговых потоков в многофазных течениях [10]. Для связки давление-скорость был использован алгоритм SIMPLE. Коэффициент релаксации для давления был принят равный 0,3; для количества движения и объемной фракции – 0,2; для скорости скольжения, турбулентной кинетической энергии и ее рассеивания – 0,2.

Скорость жидкости на входе в сопловое устройство задавалась равной 6,22 м/с (тип граничного условия velocity-inlet), избыточное давление на входе воздуха – -97 кПа (pressure-inlet), избыточное давление на выходе из эжектора – 0 Па (pressure-outlet), при этом объемное газосодержание обратных токов воздуха задавалось равным нулю. Начальное состояние установки (параметры инициализации): заполнение неподвижным воздухом при избыточном давлении 0 Па.

Моделирование осуществлялось при параметрах схождения уравнения количества движения – менее 10^{-4} , уравнения турбулентной кинетической энергии – 10^{-3} , уравнения рассеивания кинетической энергии – 10^{-3} , уравнение неразрывности – 10^{-5} , уравнения объемной доли – 10^{-4} .

Результаты численного моделирования для двух длин рабочей камеры эжектора приведены на рис. 4 и 5.

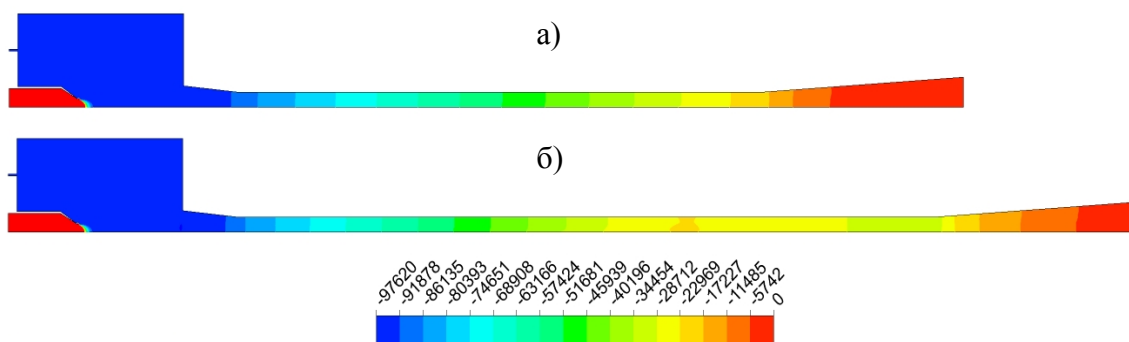


Рис. 4. Поля избыточного статического давления (Па) смеси в эжекторе с рабочей камерой длиной: а) $l = 0,3$ м; б) $l = 0,4$ м.

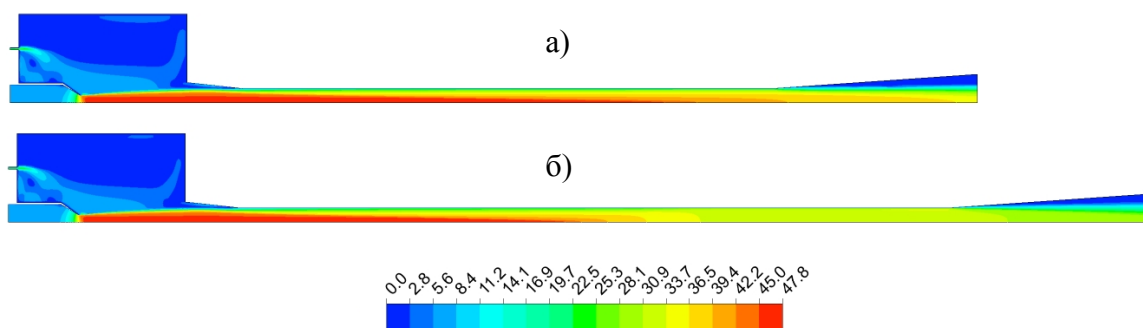


Рис. 5. Поля скорости смеси (м/с) в эжекторе с рабочей камерой длиной: а) $l = 0,3$ м; б) $l = 0,4$ м

Эффективная работа эжектора осуществляется в случае расположения прыжка перемешивания на выходе из цилиндрической части рабочей камеры [3, 5]. Расположение прыжка перемешивания (на рис. 6, 7 затемненные области) можно наблюдать по переменному характеру изменений величин скорости и давления.

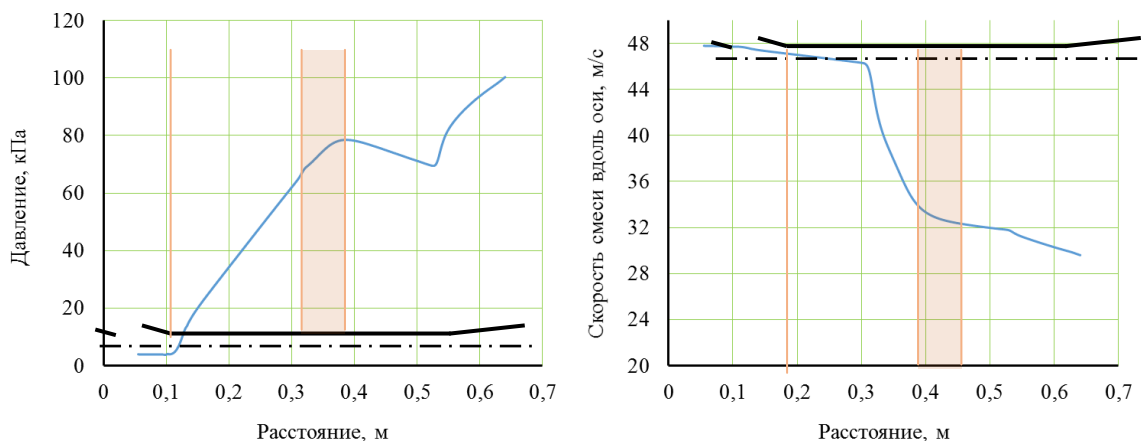


Рис. 6. Изменение скорости и избыточного давления вдоль проточной части эжектора с рабочей камерой длиной $l = 0,4$ м

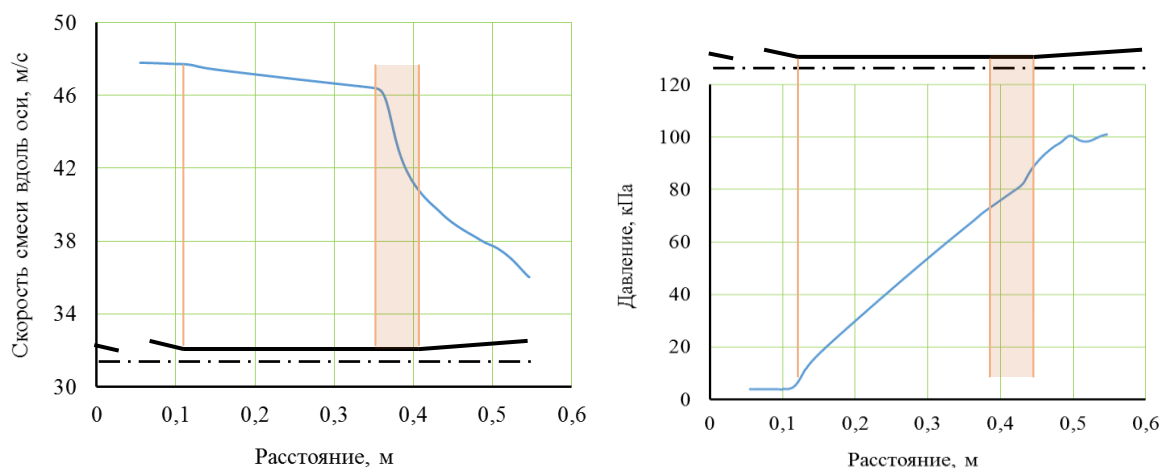


Рис. 7. Изменение скорости и избыточного давления вдоль проточной части эжектора с рабочей камерой длиной $l = 0,3$ м

Устройство ЖГЭ с рабочей камерой длиной $l = 0,3$ м является предпочтительным, т.к. прыжок перемешивания располагается на выходе рабочей камеры, а значит, происходит полное перемешивание рабочих сред с наименьшими затратами энергии. При этом прыжок перемешивания сопровождается выравниванием профиля скорости вдоль поперечного сечения рабочей камеры (рис. 8).

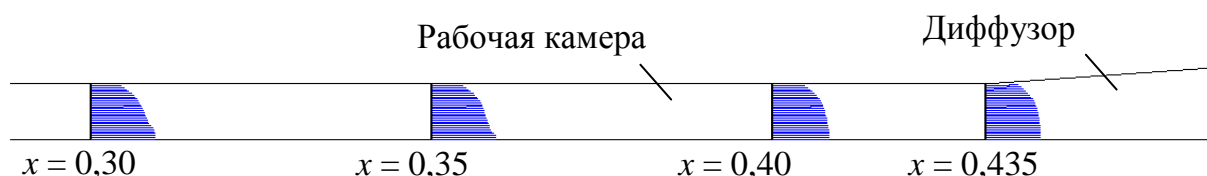


Рис. 8. Изменение профиля скорости вдоль рабочей камеры ($l = 0,3$ м)

Заключение. Проведено численное моделирование рабочего процесса в ЖГЭ с помощью программного комплекса Ansys Fluent. В результате выявлено, что рассмотренный комплекс способен решать задачи определения предпочтительных геометрических размеров ЖГЭ, в частности длины рабочей камеры.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

Библиографический список

1. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2 т. Т. 1 / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 384 с.
2. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

3. Cunningham, R.G. Jet Breakup and Mixing Throat Lengths for the Liquid Jet Gas Pump / R.G. Cunningham, R.J. Dopkin // J. Fluids Eng 96(3), pp. 216–226.
4. Witte J.H. Efficiency and design of Liquid-Gas Ejectors / J.H. Witte // British Chemical Engineering. Vol. 10. № 9. 1965. P. 602–607.
5. Васильев, Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения / Ю.Н. Васильев // Лопаточные машины и струйные аппараты. – 1971. – Вып. 5. – С. 175–261.
6. Ефимочкин, Г.И. Исследование и выбор водоструйных эжекторов с удлиненной камерой смешения / Г.И. Ефимочкин, Б.Е. Кореннов // Электрические станции. – 1976. – № 4. – С. 46–49.
7. Кореннов, Б.Е. Исследование водовоздушных эжекторов с удлиненной цилиндрической камерой смешения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.Е. Кореннов. – М.: ВТИ, 1980. – 23 с.
8. Спиридонов, Е.К. О рациональной длине смесительной камеры вакуумного водовоздушного эжектора / Е.К. Спиридонов // Теплоэнергетика. – 1982. – № 7. – С. 69–70.
9. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. SUSU Supercomputer Resources // Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016). Arkhangelsk, Russia, March 29–31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. 2016. V. 1576. P. 561–573.
10. В. Е. Launder and D. В. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England. 1972.
11. FLUENT 16.0 Documentation, FLUENT Inc., 2014.

[К содержанию](#)