

массообменном аппарате с подвижной шаровой насадкой / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2. – С. 108–112. DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-108-112.

3. Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Шаповалов Ю.П. Гидродинамика в аппаратах с подвижной насадкой // Нефтехимия-2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / Минск (22–24 нояб. 2021 г.) – Минск: БГТУ, 2021. – С. 228–231.

4. Ланкин Р.И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой // Химическая технология и техника: материалы 86-й науч.-техн. конф. професс.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов / Минск (31 янв. – 12 февр. 2022 г.) – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

5. Ланкин Р.И., Францкевич В.С., Нурмухамедов Х.С. Исследование формы элемента насадки на гидродинамику в массообменном аппарате с подвижной насадкой // Нефтегазохимия-2023: материалы VI Международного научно-технического форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке / Минск (1–3 ноября 2023 г.) – Минск: БГТУ, 2023. – С. 199–203.

УДК 621.527.4/.5

Г. А. Кляхин, маг. (ОАО «Гродно Азот»);

В. С. Францкевич, зав. кафедрой МиАХиСП, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск);

А. Н. Ерушонков, ассист.
(ИХТИ, г. Стерлитамак, Российская Федерация)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЖЕКЦИИ В ПАРОСТРУЙНОМ ЭЖЕКТОРЕ

Благодаря таким преимуществам, как простота конструкции, отсутствие подвижных частей и наличия эжектирующей среды (водяного пара), пароструйные эжекторные вакуум-насосы широко применяются в химической промышленности. Компьютерное моделирование газодинамических процессов в пароструйном эжекторе проведено при помощи пакета программ ANSYS. В качестве расчетной модели принята двухмерная область (разрез пароструйного эжектора), построенная в натуральную величину при помощи программы ANSYS «DesignModeler». Схема эжектора с основными геометрическими параметрами проточной части изображена на рисунке 1.

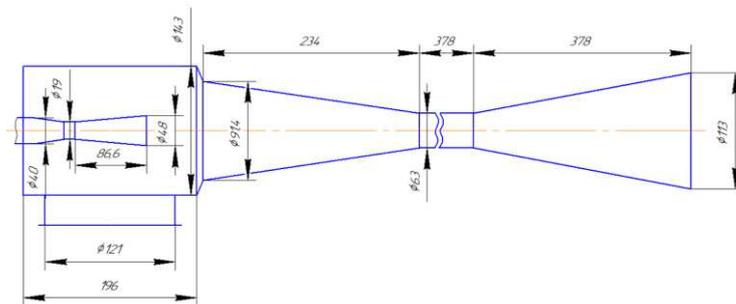


Рисунок 1 – Схема эжектора с обозначением основных геометрических параметров

Для всего участка модели, при помощи программы ANSYS «Meshing CFD», строилась расчетная сетка. Для проведения моделирования процесса эжекции в струйном аппарате, в качестве окончательной сетки, использовалась сетка с линейным порядком элементов размером 1 мм каждый. Дополнительно накладывалась «лицевая» сетка методом четырехугольников с дополнительным указанием острых углов модели. После чего, были введены «лицевая» калибровка и «мультизонный» решатель методом квадратов.

В дальнейшем для увеличения точности расчета сетку необходимо было адаптировать, то есть приходилось разбивать крупные ячейки на более мелкие (до 0,1 мм) в определенных местах модели на основании решений, полученных на начальной сетке (рисунок 2). Адаптация проводилась по градиенту числа Маха. В этом случае получались сетки с более мелкой структурой в пристеночных областях, на границах смешивающихся потоков и в областях скачков уплотнений. Количество элементов в сетке составило 156024 единицы.

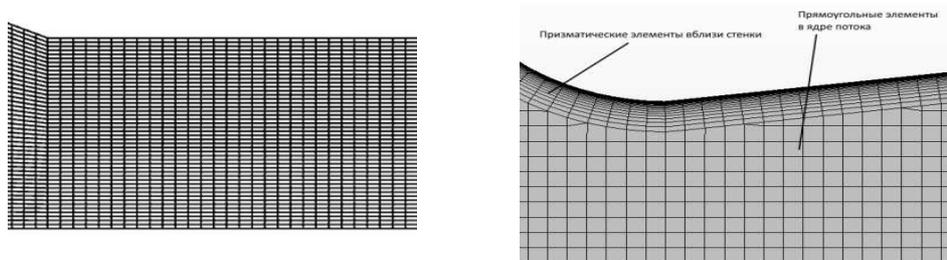


Рисунок 2 – Адаптированная сетка

Для описания объемных эффектов в двумерной модели использовался решатель плоской модели. Течение газа в эжекторе было принято, как стационарное турбулентное течение сжимаемого идеального газа. Для решения нелинейных уравнений использовался связанный неявный решатель, основанный на плотности. Все расчеты выполнялись с использованием модели турбулентности, основанную на теории ренормализованных групп (*rng k - ε*), которая, как показано в работах [1, 2, 3, 4], дает наименьшую погрешность при расчете подобных течений. Уравнения течения решались с помощью системы дис-

кретизации пространства второго порядка. Уравнения турбулентности, уравнения турбулентной кинетической энергии и скорости диссипации решались при помощи системы первого порядка. Для расчета течения в области стенки модели использовалась стандартная пристеночная функция. Для стенок проточных линий (участков) сопла, камеры смешения и диффузора установлено граничное условие «стенка», как стационарная гидродинамическая гладкая (без проявления эффекта шероховатости) адиабатическая стенка без проскальзывания потока к ней. Для увеличения скорости сходимости задачи и уменьшения времени расчета настраивались факторы нижней релаксации, число Курента и шаг отчета расчетов в консоли. Количество итераций достигло 4800.

При расчете дроссельной характеристики, были установлены следующие граничные условия: на входе в сопло – входное давление $P_p = 1,1 \text{ МПа}$ и температура торможения $T_{0p} = 473,15 \text{ К}$; на входе инжектируемого газа – входной массовый поток (задавались полной температурой $T_{0u} = 298,15 \text{ К}$ и фиксированный расход $m_u = 550 \text{ кг/ч}$); на выходе из эжектора – статическое давление $P_4 = 0,053 \text{ МПа}$ и полная температура $T_{4c} = 423,15 \text{ К}$.

На рисунке 3 показано поле температур в продольном сечении моделируемого эжектора. На выходе из сопла видны области с температурой ниже начальной температуры самого холодного, инжектируемого, потока – подобное падение температуры объясняется эффектом Джоуля-Томсона [5].

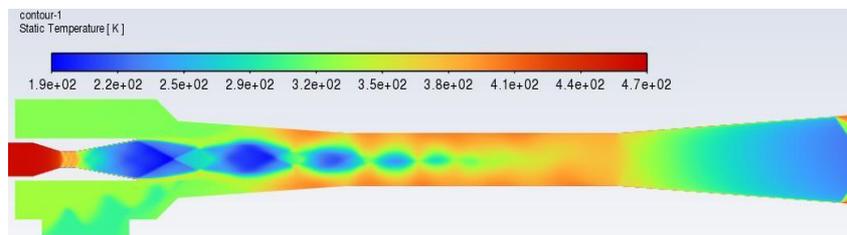


Рисунок 3 – Поле температур в продольном разрезе проточной части эжектора

Из рисунка 4 видно, что в сопле Лавалья, а также, в направлении рабочего потока, согласно принципу обращения воздействия число Маха превышает 1, то есть поток движется со сверхзвуковой скоростью. При этом видно торможение неравномерной сверхзвуковой смеси газов, происходящей в сложной системе скачков уплотнения, которая имеет значительную протяженность (профиль струи «бочкообразный»).

Для проверки адекватности компьютерной модели, сравним расчетные и экспериментальные значения степени сжатия эжектора ε – отношение полного давления на выходе из эжектора P_4 к полному давлению пассивного газа на входе в аппарат P_u . Расчетное и

экспериментальное полное давления на входе в эжектор $P_u^{\text{расч}} = 0,0213$ МПа и $P_u^{\text{эксп}} = 0,0228$ МПа соответственно. Расчетное и экспериментальные значения степени сжатия эжектора $\varepsilon^{\text{расч}} = 2,488$ и $\varepsilon^{\text{расч}} = 2,324$.

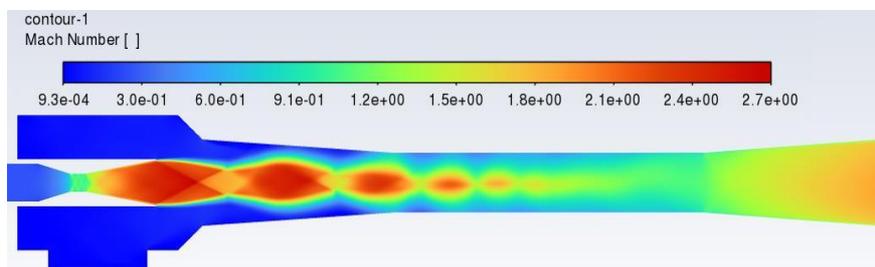


Рисунок 4 – Поле чисел Маха в продольном разрезе проточной части эжектора

Отклонение экспериментальной модели от расчетной модели, при расчете степени сжатия эжектора, составило 6,59 %.

Для анализа газодинамических процессов, протекающих в эжекторе, а именно распределения давлений и скоростей рабочего и подсываемого потоков по длине и сечению струйного аппарата, проведен численный эксперимент, на основании которого можно сделать вывод об эффективности расчетных методик, приведенных в [6, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Yin Hai Zhu, Wenjian Cai. Numerical investigation of geometry parameters for design of high-performance ejectors. Journal Applied Thermal Engineering, 2009. 989 p.
2. Hemidi A., Henry F., Leclaire S., Seynhaeve J., Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation. Journal Applied Thermal Engineering, 2009. 1523 p.
3. Bartosiewicz Y., Aidoun Z., Desevaux P., Mercadier Y. CFD-experiments integration in the evaluation of six turbulence models for supersonic ejectors modeling. Conference Proc., Integrating CFD and Experiments. UK, 2003, 10 p.
4. Hemidi A., Henry F., Leclaire S., Seynhaeve J., Bartosiewicz Y. CFD analysis of a supersonic air ejector. Part II: Relation between global operation and local flow features. Applied Thermal Engineering, 2009. 2998 p.
5. Mazzelli F., Little A.B., Garimella S., Bartosiewicz Y. Computational and Experimental Analysis of Supersonic Air Ejector: Turbulence Modelling and Assessment of 3D Effects. International Journal of heat and Fluid Flow, vol. 56. 2015, pp. 305-316.
6. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Москва, 1989. 352 с.
7. Успенский В.А., Кузнецов Ю.М. Струйные вакуумные насосы. Москва, 1973. 144 с.