

CFD-моделирование характеристик парового эжектора для разогрева нефти и нефтепродуктов в ANSYS

Д.И. Пащенко

к.т.н, доцент
pt@samgtu.ru

И.С. Наплеков

студент
naplekovilya@gmail.com

ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

Настоящая работа нацелена на разработку компьютерной модели парового эжектора для разогрева нефти, откачки нефтепродуктов и выполнения других ключевых функций в нефтегазовой отрасли. Использован программный продукт ANSYS Fluent. Процедура достижения данной цели включает в себя: алгоритм адаптации расчетной сетки, выбор модели турбулентности, определение оптимальных настроек решателя Fluent, оценка точности результатов. По итогам выполненных расчетов проведена верификация модели с использованием экспериментальных данных, а также исследование зависимости основных параметров его работы. Статья включает описание рекомендуемых настроек решателя Fluent для инженерных расчетов струйных аппаратов.

Струйные аппараты получили широкое применение практически во всех отраслях промышленности благодаря своей особенности — повышение давления газового потока без непосредственной затраты механической работы при исключительной простоте конструкции. Обобщением, систематизацией и разработкой принципов работы струйных аппаратов занимались такие ведущие отечественные ученые как Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер, Л.Д. Берман, Г.И. Ефимочкин и др. [1]. В течение последних десятилетий предложены и изучены принципы работы нескольких тысяч различных конструкций струйных аппаратов [2]. В нефтяной и химической промышленности, теплоэнергетике нашли широкое применение паровые эжекторы, основным назначением которых является смешение потоков пара высокого и низкого давлений с получением на выходе пара с заданными параметрами давления и температуры [3]. Многообразие конструкций и способов расчета этих устройств делают постоянные поиски новых инженерных решений в задачах исследования, оптимизации и производства актуальными и в настоящее время.

В последние годы в инженерной практике все большее внимание уделяется численным методам компьютерного моделирования различных физических и химических процессов — CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics) [4]. Основными достоинствами данного метода научного поиска является получение наглядного представления о характере протекающих процессов в исследуемом объекте и исследование его различных конструкций без создания дорогостоящих экспериментальных установок. А также оптимизация принципов функционирования с целью получения заданных параметров работы устройств. По оценкам специалистов NASA, к 2030 году примерно 85% вычислительной мощности всех суперкомпьютеров на земле будет задействовано для решения задач вычислительной гидродинамики [5]. Для эффективного применения CFD-моделирования имеется ряд коммерческих программ, таких

как: ANSYS, FlowVision, ComsolMultiphysics и программ с открытым кодом, как, например, OpenFOAM, Salome, Code Saturn.

Целью настоящей работы является разработка численной компьютерной модели парового эжектора в программном продукте ANSYS Fluent, ее верификация с использованием экспериментальных данных, а также проведение исследования зависимости основных параметров его работы. Современные программные и вычислительные средства расчетов позволяют производить широкий спектр исследований различных устройств без создания физических моделей этих объектов. Станет ли возможным полная или частичная замена физического эксперимента для большинства струйных аппаратов численным компьютерным моделированием, будет зависеть от всестороннего исследования различных моделей турбулентности и постоянного совершенствования алгоритмов CFD-моделирования.

Объектом исследования является паровой эжектор, геометрические характеристики которого приведены на рис. 1. В данном эжекторе происходит смешение потоков пара высокого (Вход 1) и низкого давлений (Вход 2) с получением на выходе пара (Выход) с заданными параметрами давления.

Поставленная задача CFD-моделирования решается как в двухмерной (для определения оптимальных настроек решателя Fluent), так и в трехмерной постановках условий. Построение геометрии выполнено в системе автоматизированного проектирования Autodesk AutoCAD. Расчетная геометрия полностью повторяет геометрические характеристики реального действующего эжектора.

Для выполнения численного эксперимента на вычислительную геометрию наложена расчетная сетка. Повышение точности решения задачи осуществляется за счет адаптации сетки во встроеном в ANSYS модуле Meshing. С целью увеличения количества конечных объемов параметр, отвечающий за плотность расчетных ячеек (Relevance), был установлен

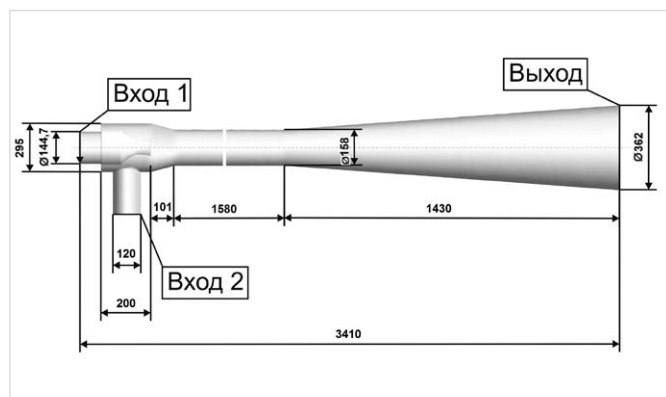


Рис. 1 — Геометрические характеристики пароструйного эжектора
Fig. 1 — Geometry of steam jet ejector

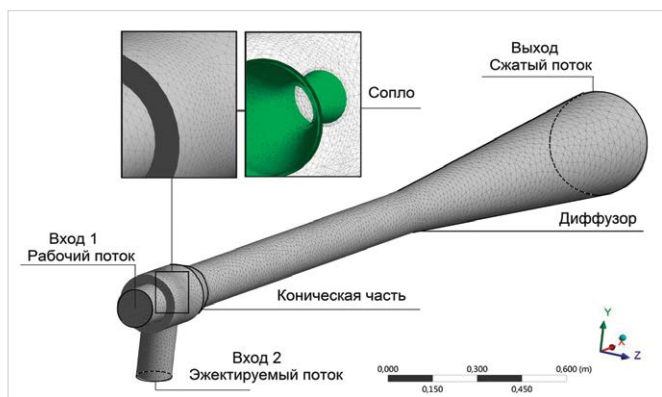


Рис. 2 — Расчетная сетка
Fig. 2 — Computational mesh

Материалы и методы

Построение геометрии выполнено в системе автоматизированного проектирования Autodesk AutoCAD. Расчет произведен в программном продукте Ansys Fluent.

Ключевые слова

характеристики истечения, эжектор, нефтегазовая отрасль, CFD-моделирование, модели турбулентности, уравнение Навье-Стокса

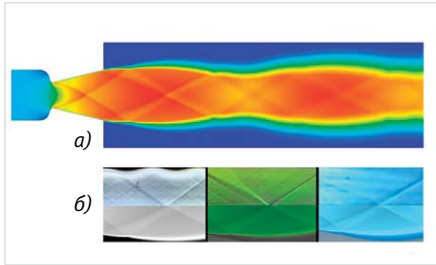


Рис. 3 — Сравнение результатов численного и физических экспериментов: а) истечение из сопла в свободное пространство; б) в верхней полуплоскости — эксперимент, в нижней — модель с различной цветовой заливкой

Fig. 3 — Comparison of numerical and physical experiment results: a) Nozzle to free space exhaust; b) experiment in the upper semiplane; model in different colors in the lower semiplane

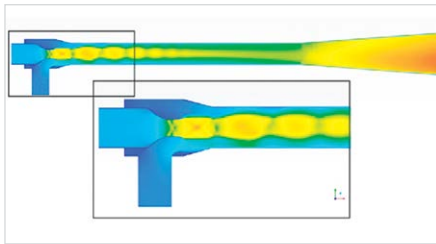


Рис. 4 — Профиль скорости в пароструйном эжекторе

Fig. 4 — Velocity profile for steam jet ejector

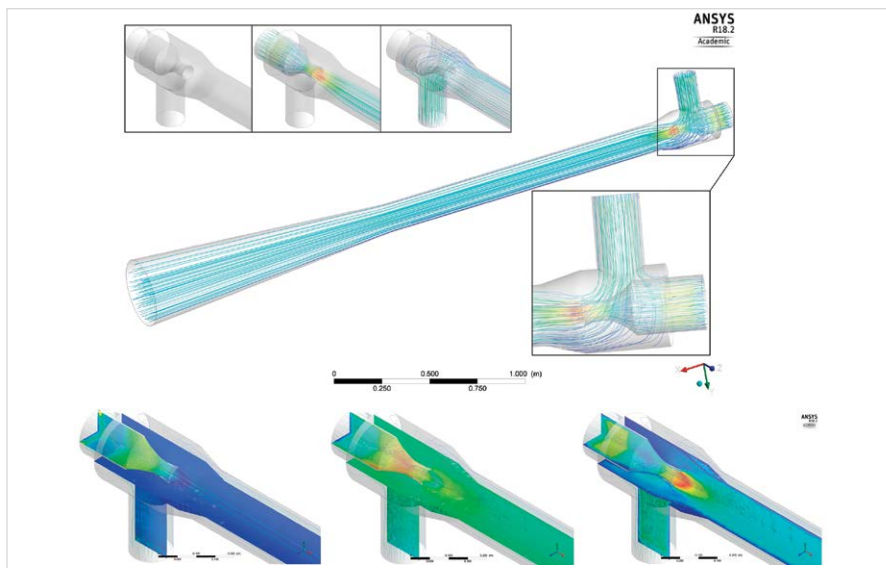


Рис. 5 — Трехмерная визуализация результатов расчета: а) траектории линий тока пара в эжекторе; б) профили: слева направо — давление, температура, скорость

Fig. 5 — 3D visualization of the computation results: а) steam current flow lines in ejector; б) profiles: from left to right — pressure, temperature, velocity

на значении 95. Общее количество элементов сетки — 492424, при этом минимальное значение грани элемента составляет 1,27 мм, максимальное значение 250 мм. Общий вид расчетной сетки приведен на рис. 2.

В настройках Setup решателя Fluent тематическое описание процесса истечения выражается системой дифференциальных уравнений, состоящих из уравнений неразрывности, закона сохранения количества движения и закона сохранения энергии, в общем виде описанные в Ansys Fluent 14.0: Theory Guide [6].

Для замыкания уравнений Навье-Стокса [7], описывающих движения пара в эжекторе, используется модель турбулентности k-ε Realizable с улучшенными пристеночными функциями, учитывающими линейные и логарифмические участки в распределении скорости в пристеночном слое. Для упрощения расчета вследствие высоких скоростей пара, в настройках Fluent установлен нулевой градиент теплового потока через стенку — тепловые потери через стенку отсутствуют [8].

Вследствие большого количества элементов сетки гибридная инициализация проводится в 10 итераций. По той же причине выбрано количество итераций на временной шаг равное 30. Повышение количества итераций при высоком качестве сетки значительно усложняет вычисления, не давая при этом высокого роста точности. Временной шаг составляет 0,001 с, их количество — 100 для двумерной задачи и 10 — для трехмерной. Такое число временных шагов позволяет получить устоявшуюся картину истечения на всем пространстве потока газа.

Проведена верификация модели: определение настроек решателя Fluent, позволяющих получить распределение контуров скорости и давления в эжекторе, максимально точно соответствующих реальным процессам. Для этого исследовался процесс истечения пара высокого давления в свободный объем с атмосферным давлением. На рис. 3 показаны результаты численного исследования процесса истечения газа в свободный объем

(а) и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (б).

Здесь на рис. 3б показано наложение контура скорости, полученного с помощью эксперимента (верхняя часть) с результатами вычислений (нижняя часть). Решение задачи моделирования истечения в свободный объем является важным этапом верификации и валидации расчетной модели. В случае совпадения контуров скорости, полученных в численном и вычислительном эксперименте, можно утверждать, что выбранные настройки решателя и константы модели турбулентности максимально точно описывают физический процесс. Рис. 3б показывает однозначное совпадение численных и экспериментальных контуров скорости, изменение цвета заливки выполнено в модуле CFD-Post.

Контур распределения скорости в пароструйном эжекторе показан на рис. 4 для исходных данных, приведенных в таблице 1. Трехмерная визуализация траекторий линий тока пара и контуров давления, температуры и скорости показана на рис. 5.

Для инженерных расчетов струйных аппаратов, в частности паровых эжекторов, в программном продукте ANSYS рекомендуется использовать следующие настройки решателя Fluent, позволяющие максимально точно описать физические процессы, протекающие в этих устройствах:

- тип решателя — pressure based;
- подключение уравнения сохранения энергии — energy equation "On";
- рабочее тело — водяной пар (water-vapor);
- расчет плотности — идеальный газ (ideal gas);
- среда атмосферного давления (operating conditions);
- задание граничных условий через массовый расход (mass flow inlet);
- для всех параметров состояния уравнения второго порядка (second order upwind);
- неявный вид уравнения первого порядка для нестационарного расчета (first order implicit);
- гибридная схема инициализации (hybrid initialization)

Итоги

Приведена компьютерная модель парового эжектора для разогрева нефти, отдачи нефтепродуктов и др. Общая погрешность результатов рабочего режима для давления составила 2,2%, для температуры — 1,6%. Для других расчетных режимов погрешности также не превышали 2–3% для давления и температуры. Предложено описание рекомендуемых настроек решателя Fluent для инженерных расчетов струйных аппаратов. Полученные результаты согласуются с теоретическими и экспериментальными данными в пределах отклонений около 2–4% и изложены в виде линий тока, контуров, графиков и таблицы. Установлены расчетные режимы эжектора для заданных параметров его работы.

Выводы

Показанные выше примеры и результаты иллюстрируют, что современные численные методы решения задач вычислительной гидродинамики позволяют максимально полно воспроизводить физический эксперимент с минимальными погрешностями, не превышающими нескольких процентов. Таким образом,

необходимость проведения затратных как по времени, так и по финансам физических экспериментов, связанных с определением режимов работы пароструйных эжекторов для разогрева нефтепродуктов различного состава и с различной температурой, существенно снижается. На первый план может выходить численный компьютерный эксперимент. Однако без достоверных результатов физических экспериментов и их сопоставления с результатами моделирования невозможно говорить об адекватности разработанных моделей. Для профиля скорости истечения из сопла в свободное пространство наблюдается ромбовидный скачок уплотнения, характерный для всех процессов истечения с числом Маха больше единицы ($M > 1$). Рабочий поток пара с высоким давлением (1,317 МПа) в процессе истечения из сопла инжектирует поток пара с низким давлением

(0,147 МПа), в результате чего на выходе образуется пар с давлением 0,414 МПа.

Список литературы

1. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 2-е издание. М.: Энергия, 1970. 288 с.
2. Каменев П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. М.: Стройиздат, 1964. 403 с.
3. Сазонов Ю.А., Казакова Е.С., Димаев Т.Н. Исследование многопоточных эжекторов и решение задач по добыче и перекачке нефти и газа // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2012. №4. С. 21–23.
4. Пащенко Д.И., Частикова О.И., Михедов А.А. Математическое моделирование процессов теплообмена в реакционном элементе системы термохимической регенерации теплоты

- // Вестник самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2017. №1. С. 133–142.
5. Slotnick J., Khodadoust A. and oth. CFD Vision 2030 Study: A Path to Revolutionary Computational Aerosciences. NASA report, 2014, 51 p.
 6. Ansys Fluent 14.0: Theory Guide. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide> (дата обращения 29.08.17)
 7. Shih T.H. and oth. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows // Computers & Fluids. 1995. issue 3. pp. 227–238.
 8. Наплеков И.С. Численное исследование характеристик истечения газового потока из сопла двигателя SpaceX Raptor // Молодежный научный вестник. 2017. №56. С. 19–27.

ENGLISH

PUMPS

CFD modeling of properties of steam ejector for oil and oil product heating in ANSYS

UDC 621.176

Authors:

Dmitry I. Pashchenko — Ph.D., assistant professor; pt@samgtu.ru
Ilya S. Naplekov — student; napekovilya@gmail.com

Samara State Technical University (Samara Polytech), Samara, Russian Federation

Abstract

The purpose of this work is developing a computer model of steam ejector for oil heating, oil product pumpout, and performing of other key functions in the oil and gas industry ANSYS Fluent is applied. To achieve this purpose a procedure is used including a computational mesh adaptation algorithm, a selection of the turbulence model, a determination of the optimal settings of Fluent problem solver, an assessment of the accuracy of the results. Based on the results of the computations made, the model is verified using experimental data and a dependency of the basic parameters of its work is studied. The article includes a description of the recommended settings for the Fluent problem solver for the engineering computations of the jet devices.

Materials and methods

The geometry was developed in Autodesk AutoCAD. The computation is made in Ansys Fluent.

Results

A computer model of steam ejector for heating oil, pumping out oil products etc. is introduced. Overall uncertainty of the results of the operating mode for pressure is 2.2%, for temperature it is 1.6%. For other computation modes, the uncertainties do not exceed 2–3% for temperature and pressure. A description of recommended settings is proposed for Fluent solver for engineering computations of the jet devices. The obtained results correspond with theoretical and experimental data within 2–4% deviations, and are presented as current paths, contours, graphs, and a table. Ejector computation modes are defined for the preset parameter of its operation.

Conclusions

The above examples and results illustrate how modern numerical methods of computational fluid dynamics problem solving allow simulating a physical experiment fully with minimal uncertainties not exceeding several percent. Thus, it significantly reduce

a requirement to conduct time and money consuming experiments related to defining steam ejector operating modes for heating the oil products of different composition. Numerical computer experiment can come to prominence. However, it is not possible to speak about adequacy of the developed models without consistent results of the physical experiments and without their comparison with the modeling results.

For the nozzle to free space exhaust velocity profile, a mach diamond is observed, which characteristic of all exhaust processes with Mach number over 1 ($M > 1$). High pressure steam workflow (1.317 МПа) during the exhaust process injects low pressure steam flow (0.147 МПа), which results in the formation of 0.414 МПа steam.

Keywords

exhaust characteristics, ejector, oil and gas industry, CFD modeling, turbulence models, Navier-Stokes equation

References

1. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struynye apparaty* [Jet devices]. 2nd edition. Moscow: Energiya, 1970, 288 p.
2. Kamenev P.N. *Gidroelevatory v stroitel'stve* [Hydraulic ejectors in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1964, 403 p.
3. Sazonov Yu.A., Kazakova E.S., Dimaev T.N. *Issledovanie mnogopotochnykh ezhektorov i reshenie zadach po dobyche i perekachke nefi i gaza* [Study of the multiflow ejectors and solution of problems related to oil and gas production and pumping]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2012, issue 4, pp. 21–23.
4. Pashchenko D.I., Chastikova O.I., Mikhedov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplomassobmena v reaktionnom elemente sistemy termokhimicheskoy regeneratsii teploty* [Mathematic modeling of heat and mass exchange processes in the reaction element of the thermochemical heat regeneration system]. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2017, issue 1, pp. 133–142.
5. Slotnick J., Khodadoust A. and oth. CFD Vision 2030 Study: A Path to Revolutionary Computational Aerosciences. NASA report, 2014, 51 p.
6. Ansys Fluent 14.0: Theory Guide. Available at: <https://en.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide> (accessed 29 August 2017)
7. Shih T.H. and oth. A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 1995, issue 3, pp. 227–238.
8. Naplekov I.S. *Chislennoe issledovanie kharakteristik istecheniya gazovogo potoka iz sopla dvigatelya SpaceX Raptor* [Numerical study of the properties of the gas flow exhaust from the SpaceX Raptor engine nozzle]. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik*, 2017, issue 56, pp. 19–27.