

Сравнительный анализ методик расчета эрлифтных установок

Алексеев Д.П., Шейпак А.А.

ФБГОУ Московский государственный индустриальный университет
sheypak.anatoly@yandex.ru

Аннотация. В работе проведен расчет характеристик эрлифтной установки на основе методов вычислительной гидродинамики (cfd). В результате численного моделирования работы эрлифтной установки получены ее характеристики, а также скалярное поле распределения газовой фазы. Рассмотрены основные методики расчета эрлифтных установок: методика Гейера, методика, разработанная в ДонНТУ, а также cfd-метод. Проведен сравнительный анализ точности этих методик. Показано, что результаты расчета на основе методов вычислительной гидродинамики и результаты, полученные по методике ДонНТУ, согласуются между собой.

Ключевые слова: эрлифтная установка, многофазное течение, вычислительная гидродинамика, метод контрольного объема.

Введение

Повышение энергетической эффективности гидравлических машин и аппаратов является одной из важных и приоритетных задач на пути их модернизации и совершенствования. В большей степени это относится к низко экономичным гидравлическим аппаратам. Эрлифты относятся к гидравлическим аппаратам с достаточно сложными, далеко не до конца изученными гидродинамическими процессами движения газожидкостных потоков в проточной части эрлифта. Эрлифт был впервые предложен выдающимся русским инженером В.Г. Шуховым в конце XIX века.

Востребованность эрлифтов в системах водоотлива и гидроподъема обусловлена рядом их известных преимуществ в сравнении с насосным оборудованием, из которых наиболее часто выделяют простоту и дешевизну конструкции и надежность в эксплуатации. Применение существующих конструкций эрлифтов в некоторых областях промышленности позволяет получить выигрыш по энергозатратам до 10% по сравнению с другими насосными установками [1]. Поэтому увеличение эффективности эрлифтных установок за счет улучшения конструкции в несколько раз превысит озвученные оценки. На сегодняшний день наиболее нуждающимися в эффективных эрлифтах областями промышленности являются бурение водяных и нефтяных скважин, очистка сточных вод, добыча полезных ископаемых.

В настоящее время при проектировании такого вида гидравлических аппаратов применяются далеко не совершенные аналитические модели, основанные на полуэмпирических формулах методики, позволяющие определить основные геометрические параметры эрлифтов, а также получать некоторые основные характеристики таких аппаратов (расходная и пр.) [2]. Движение газожидкостного потока в проточной части эрлифта относится к области многофазных течений. Учет взаимодействия фаз в такого рода течениях играет большую роль и существенно сказывается на характеристиках эрлифтов. Существующие методы расчета не позволяют в полной мере исследовать все физические явления, протекающие в подъемной трубе эрлифта, в том числе распределение и взаимодействие фаз; получать распределение скоростей и давлений в проточной части эрлифта. А значит, не позволяет создавать рекомендации по модернизации и оптимизации конструкций таких насосов.

Поэтому адекватное математическое описание рабочего процесса эрлифта является весьма актуальной научной задачей, играющей важную роль в разработке более эффективных конструкций эрлифтов, т.е. имеющей существенное практическое приложение.

Цель и объект исследования

Исследование течения газожидкостного потока в проточной части эрлифта проводи-

лось на описанной ниже модели. На рисунке 1 приведена схема эрлифтной установки. Межконцевое расстояние труб $a=600$ мм. Ширина B и глубина L отстойника соответственно 10 и 30 м. Диаметры и длины труб, а также высоты подъема и погружения эрлифта приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Высота подъема h , м	Высота погружения H , м	Диаметр главной трубы (смесителя) D , мм	Длина главной трубы $H+h$, м	Диаметр вспомогательной трубы d , мм
5	25	300	30	120

Проточная часть эрлифта представляет собой трубу для подъема жидкости из бака вертикально вверх. Подъем осуществляется за счет взаимодействия находящийся в баке жидкости (воды) с подводимым по вспомогательной трубе газом (воздухом). Газ подается из трубы через систему сопел (сорок диаметрально расположенных сопел). Область подъемной трубы с расположенными в ней соплами называется смесителем. Методами численного моделирования анализируется течение газожидкостного потока в подъемной трубе эрлифта с целью определения скалярных полей давления и векторных полей скорости, а также распределения концентрации фаз и определения расчетных характеристик эрлифта.

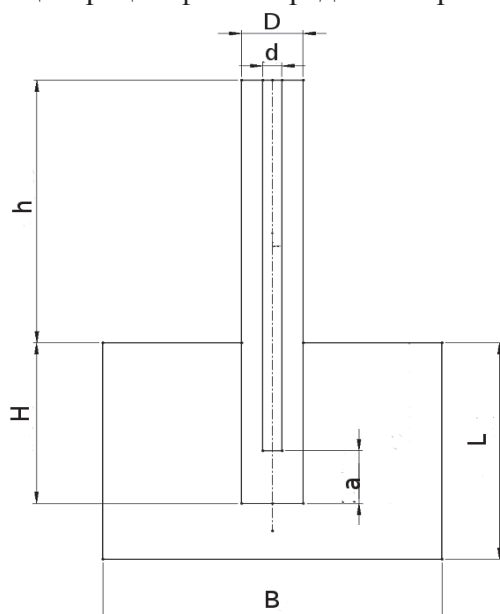


Рисунок 1. Схема эрлифтной установки

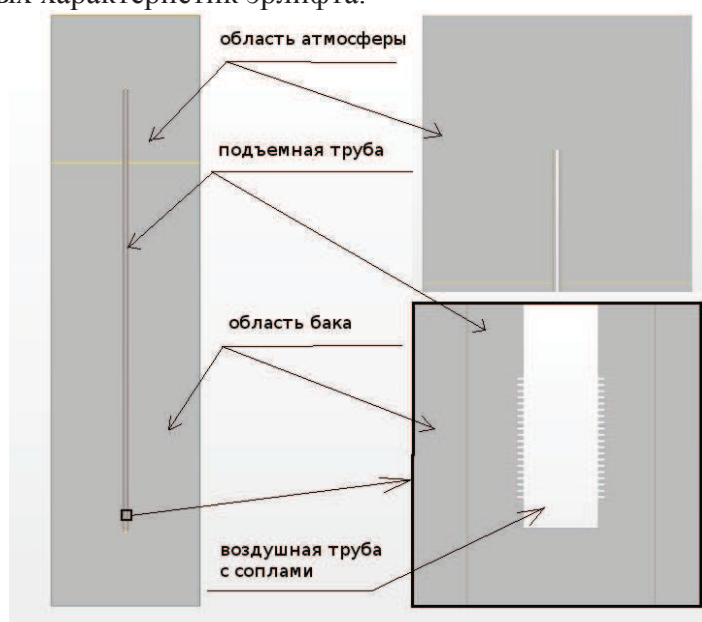


Рисунок 2. Геометрическая модель расчетной области

Постановка задачи

CFD-метод.

Рассматривается нестационарное (шаг по времени $0.005c$) изотермическое трехмерное движение газожидкостного потока в проточной части эрлифта. Подъемная труба эрлифта погружена вертикально вверх в открытый бак с водой на заданную величину, смеситель расположен на заданном расстоянии от нижнего концевое сечения трубы, часть трубы, не погруженная в бак, находится в окружающей трубу атмосфере (рисунок 2). На поверхности бака и для области, моделирующей атмосферу, задается давление окружающей среды. Воздух в смеситель подается через сопла с заданным расходом. В подъемной трубе на уровне высоты

бака, а также между областями атмосферы и бака задается поверхность раздела. На остальных твердых границах задается условие прилипания.

В качестве исходных данных использовались следующие параметры:

- поднимаемая жидкость: вода,
- вязкость воды: 1,012 сСт,
- высоты подъема и размеры труб приведены в таблице 1,
- плотность воды: 1000 кг/м³,
- массовый расход подводимого газа 2.6-10.4 кг/с с шагом 3.9 кг/с,
- коэффициент поверхностного натяжения на поверхности раздела фаз воды и воздуха: 0,076 н/м.

Коэффициент погружения эрлифта определяется по формуле:

$$c = \frac{H}{h + H}, \quad (1)$$

где: H - высота погружения (м), h - высота подъема жидкости над уровнем бака (м).

Для исследуемого объекта коэффициент погружения составил 0,8.

Работа эрлифта может быть представлена в форме зависимости подачи (расход смеси) эрлифта от расхода подаваемого в устройство воздуха.

Характеристика эрлифтной установки строится в безразмерных параметрах [3, 4, 5]. Безразмерный объемный расход вычисляется как для расхода смеси на выходе из подъемной трубы, так и для расхода подводимого в эрлифт воздуха.

Для исследуемого объекта безразмерный расход для газа и смеси вычислялся:

$$Q'_g = \frac{Q_g}{A(gd)^{0.5}}, \quad (2)$$

$$Q'_m = \frac{Q_m}{A(gD)^{0.5}}, \quad (3)$$

где: Q'_g , Q'_m – безразмерные расходы газа и смеси соответственно, Q_g , Q_m – объемные расходы газа и смеси (м³/с), d – диаметр трубы подвода воздуха (м), D – диаметр подъемной трубы (м), A – площадь поперечного сечения труб (м).

Методика Гейера.

Для получения расчетных характеристик эрлифтов в настоящее время наиболее широко используется методика Гейера [1]. Согласно этой методике расход смеси на выходе из подъемной трубы эрлифта Q_m и расход подводимого к эрлифту воздуха Q_1 связаны через удельный расход воздуха q следующим соотношением:

$$Q_m = \frac{Q_g}{q}. \quad (5)$$

Необходимый удельный расход воздуха определяется из выражения:

$$q = \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{\rho g h}{2 P_a} \right), \quad (6)$$

где: α – относительное погружения эрлифта, h – глубина погружения подъемной трубы, P_a – атмосферное давление.

Методика ДонНТУ.

В настоящее время расчету эрлифтов посвящены многие статьи. Появляются более новые, уточняющие методики получения характеристик эрлифтов. Одна из таких методик разработана в ДонНТУ на основе подхода Гейера и анализа экспериментальных данных различ-

ных эрлифтов [5]. Согласно этой методике подача (расход смеси) эрлифтной установки определяется соотношением:

$$Q_m = C \cdot D^{2,5}, \quad (7)$$

где: C – введенный коэффициент производительности эрлифта.

Выражение для коэффициента производительности получено из анализа экспериментальных данных и записывается как:

$$C = -1.96 + 8.96\alpha + 2.574 \cdot \left(1 - e^{-0,5 \cdot \left(\frac{Q_g}{Q_b} - 1 \right)} \right), \quad (8)$$

где: Q_b – расход воздуха, при котором в эрлифте наблюдается барбатажный режим работы (подача эрлифта равна нулю).

Барбатажный режим работы определяется выражением:

$$Q_b = (2..3) \cdot D^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot \left(1 + \frac{\rho g h}{2P_a} \right). \quad (9)$$

Численное моделирование движения газожидкостного потока в подъемной трубе эрлифта

В основе численного моделирования движения газожидкостного потока в подъемной трубе эрлифта лежит использование основных подходов из области вычислительной гидродинамики. Расчетная область разбивается на конечное число малых объемов (дискретизируется), для которых решаются основные уравнения механики жидкости и газа, представляемые также в дискретной форме [6]. В качестве метода дискретизации используется метод контрольного объема [6]. Получаемая в результате дискретизации система алгебраических уравнений решается итерационным методом Гаусса-Зейделя. Расчетная область разбита на 3 млн. конечных объемов гексоэдральной формы (гексоэдральных ячеек).

Движение газожидкостного потока в эрлифте носит выраженный турбулентный характер [7] и описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и уравнением неразрывности. Для замыкания системы уравнений использовалась двухпараметрическая модель турбулентности $k - \epsilon$.

В качестве модели многофазного взаимодействия сред используется модель объема жидкости VOF [7, 8, 9].

Для формулировки поставленной задачи (п. Постановка задачи) в среде программного комплекса Star-CCM+ на расчетную область (РО) наложены следующие граничные условия (ГУ): Mass Flow – задается значение массового расхода на входе в РО; Pressure Outlet – задается значение статического давления на выходе из РО; Wall – непроницаемая стенка, на которой задается условие прилипания. Концентрация фаз задается для каждого граничного условия отдельно в зависимости от наличия или отсутствия фазы на границе РО.

Начальные условия задаются согласно расположению фаз в начальный момент времени. Для области атмосферы задается стопроцентное содержание газа ($\alpha = 1$). Для области бака – стопроцентное содержание жидкости (бак заполнен полностью). Для области подъемной трубы задается функция распределения фаз по высоте трубы (динамический уровень жидкости в погруженной трубе). В начальный момент времени система находится в покое – скорости равны нулю.

Результаты расчетов

В результате проведенных расчетов получены скалярные и векторные поля параметров потока (скорости, давления, концентрации фаз) в подъемной трубе эрлифта для трех значе-

ний расхода подводимого воздуха.

На рисунке 3 показано векторное поле скорости в области нижнего концевого сечения на установившемся режиме работы эрлифта. Показан подсос жидкости из бака с примерно постоянной скоростью 3.5 м/с (осредненный профиль по сечению) при значении расхода подаваемого через сопла воздуха 10.6 кг/с .

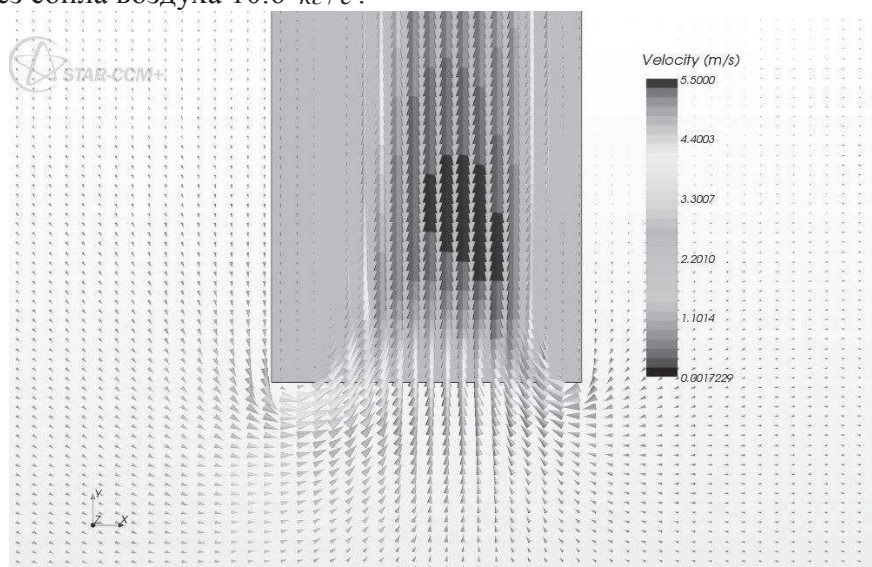


Рисунок 3. Векторное поле скорости в области концевого сечения трубы на установившемся режиме работы эрлифта

Полученная расходная характеристика исследуемого объекта в форме зависимости безразмерного расхода смеси от безразмерного расхода подаваемого воздуха показана на рис. 5 кривой салатового цвета. С увеличением расхода подаваемого воздуха скорость смеси на выходе из подъемной трубы возрастает. Форма полученной характеристики качественно совпадает с имеющимися экспериментальными данными [2, 4, 9].

На рисунке 4 также приведено сравнение полученной расходной характеристики эрлифта с характеристиками, рассчитанными по существующим методикам.

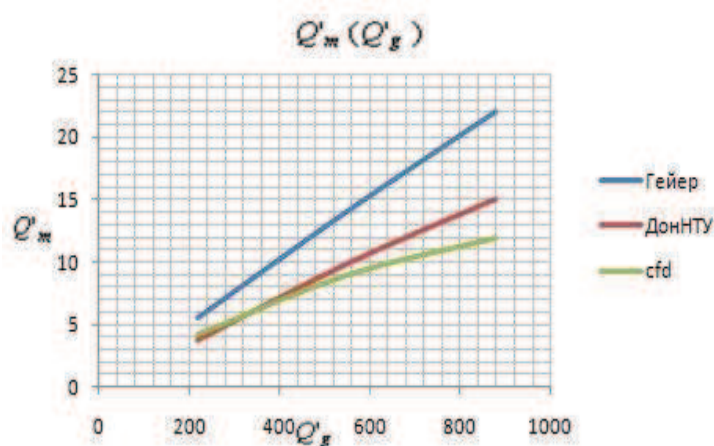


Рисунок 4. Сравнение расходных характеристик эрлифта

Для крайнего нижнего значения расхода из заданного диапазона наблюдается совпадение результатов компьютерного моделирования и результатов расчета по методике ДонНТУ. Результаты расчетов по методике Гейера расходятся с методикой ДонНТУ и компьютерным моделированием более значительно. С увеличением расхода воздуха расхождение между сравниваемыми результатами увеличивается.

Заключение

Проведено численное моделирование работы эрлифтной установки: получены ее ха-

рактеристики, а также скалярное поле распределения газовой фазы. Проведен сравнительный анализ существующих методик расчета эрлифтных установок. На базе численного моделирования движения газожидкостного потока в проточной части эрлифтной установки проведено сопоставление точности методики расчета эрлифтов, основанной на численном моделировании, методики, разработанной в ДонНТУ, а также методики расчета по Гейеру. Показано частичное совпадение методики численного моделирования с методикой ДонНТУ.

Литература

1. Эрлифтные установки: Учебное пособие / В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, Я.К. Антонов – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
2. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: ХПИ.– 2006. - № 5/1 (23). - с. 58-61.
3. Loos S.R.A., Schaaf J., Tiggelaar R.M., Nijhuis T.A., Croon M.H.J.M., Schouten J.C. Gas-liquid dynamics at low Reynolds numbers in pillared rectangular micro channels // Journal: Microfluidics and Nanofluidics Vol. 9 Issue 1 Published: 2010-06-07/
4. Douglas Joseph Reinemann, A theoretical and experimental study of airlift pumping and aeration with reference to aquacultural applications // A Thesis: Cornell University 1987
5. Малеев В.Б., Игнатов А.В. Работа эрлифта при постоянном расходе сжатого воздуха // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна» № 7(135). 2008. с. 108–113.
6. Роуч П. Вычислительная гидродинамика, «Мир», 1980 г.
7. A. Nenes, D. Assimacopoulos, N. Markatos, E. Mitsoulis Simulation of Airlift Pumps for Deep Water Wells // Department of Chemical Engineering: National Technical University of Athens, GR-157 80 Athens, Greece.
8. Amit Kumar CFD Modeling of Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed // Department of Chemical Engineering: National Institute of Technology Rourkela-769008 Orissa, 2008.
9. Методология Starccm+, 2011.
10. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ "ХПИ". – 2006. - № 27. - с. 113-121.