

Горбатов Даниил Анатольевич¹
sum1996@yandex.ru

Иванов Евгений Александрович¹
20evgeniy08@mail.ru

Иванов Олег Александрович¹
ivanov_o_a@bk.ru

Адрианов Артемий Владимирович¹
mr_a@inbox.ru

¹ООО «СУЛАК», Россия, г. Санкт-Петербург

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАПАДАНИЯ НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРУЖНОГО НАСОСА С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация. С целью обеспечения западания напорной характеристики на режимах больших подач рассмотрены различные варианты исполнения проточной части погружного насоса. Выполнены численные гидродинамические расчёты, по результатам которых изготовлены рабочее колесо и направляющий аппарат модернизированной проточной части с применением технологии 3D-печати. При проведении натурных испытаний со снятием напорных характеристик показано, что один из вариантов проточной части насоса имеет наиболее выраженное западание напорной характеристики.

Ключевые слова: насос, характеристика, напор, аппарат, турбулентность, 3D-печать.

Gorbatov Daniil¹, engineer
sum1996@yandex.ru

Ivanov Evgeniy¹, engineer
20evgeniy08@mail.ru

Ivanov Oleg¹
ivanov_o_a@bk.ru

Adrianov Artemy¹, general director
mr_a@inbox.ru

¹LLC «SULAK», Russia, St. Petersburg

ENSURING THE SUBSIDENCE OF THE PRESSURE CHARACTERISTICS OF THE SUBMERSIBLE PUMP USING 3D PRINTING

Abstract. In order to ensure the subsidence of the pressure characteristic at high flow rates, various versions of the flow part of the submersible pump are considered. Numerical hydrodynamic calculations were carried out, based on the results of which the impeller and the guiding apparatus of the modernized flow part were manufactured using 3D printing technology. When conducting full-scale tests with the removal of pressure characteristics, it was shown that one of the variants of the flow part of the pump has the most pronounced dropping of the pressure characteristic.

Keywords: submersible, pump, head, characteristic, axial, 3D-printing, FDM.

Введение

В настоящее время в энергомашиностроительной отрасли все более широкое применение находят аддитивные технологии, включающие различные промышленные принтеры для 3D-печати [1]. Технология трёхмерной печати предоставляет обширный спектр возможностей, среди которых — технология быстрого прототипирования изделий (ТБП), то есть быстрое создание опытных образцов или рабочей модели для функциональной оценки изделия и проверки возможности реализации. ТБП все чаще применяется предприятиями по производству насосного оборудования с целью исследования влияния различных элементов проточной части насоса (рабочие колеса, подводящие и отводящие устройства) на его напорные, энергетические и кавитационные характеристики. 3D-печать широко используется при изготовлении сложных отливок для многих насосов, включая погружные, циркуляционные, вихревые и т. д. Производство компонентов насоса традиционными методами в рамках исследовательской работы прикладных задач может быть достаточно дорогостоящим процессом по сравнению с технологиями изготовления посредством 3D-печати.

Технология 3D-печати стремительно набирает обороты, ассортимент материалов с каждым днём растёт, что способствует постепенному снижению стоимости. Материалы, используемые для 3D-печати компонентов насосов, разнообразны и могут варьироваться от полилактидов до нержавеющей сталей. Выбор материала обусловлен свойствами, которыми должно обладать изделие. Известно, что одним из главных и определяющих преимуществ 3D-печати по сравнению с традиционными методами производства, является значительно низкая себестоимость изготовления изделия. Также традиционный процесс производства часто приводит к большому количеству отходов, а на изготовление изделия уходит достаточно много времени. С помощью 3D-печати можно сократить число отходов, а также временной интервал (до нескольких часов) за счёт более эффективного использования ресурсов.

Таким образом, 3D-печать является прогрессивной технологией, позволяющей значительно сократить, в первую очередь, временные и финансовые затраты с сохранением прочности, жёсткости и качества рабочих поверхностей производимого изделия, а также повысить гибкость и конкурентоспособность производства.

Расчёт проточной части

Первым этапом исследовательской работы является проектирование [2,3] и численные расчёты модернизированной проточной части погружного насоса с основными техническими параметрами: подача $Q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H = 20 \text{ м}$, частота вращения $n = 2950 \text{ об/мин}$, диаметр рабочего колеса $D_2 = 183 \text{ мм}$.

Основные отличия существующей и модернизированной проточной части приведены в таблице 1.

Проектирование и численные расчёты выполнялись в программном комплексе ANSYS17.2. В первую очередь, проводилась валидация численной модели путём сравнения экспериментальных

данных и результатов численного расчёта существующей проточной части погружного насоса. Далее осуществлялось проектирование и численный расчёт модернизированной проточной части.

Таблица 1

Проточные части погружного насоса

Существующая проточная часть	Модернизированная проточная часть
РК с цилиндрической лопастной системой	РК с пространственной лопастной системой
НА радиального типа	НА осевого типа

Существующая и модернизированная проточная часть погружного насоса представлена на рисунках 1–2 соответственно.

Построение расчётной сетки выполнено в сеточном генераторе «Meshing», входящего в программный комплекс ANSYS17.2. Элементы расчётной сетки – тетраэдры. В областях, где сосредоточены высокие градиенты локальных параметров потока (твёрдые стенки РК и НА) сгенерированы призматические слои.



Рис. 1. Существующая проточная часть



Рис. 2. Модернизированная проточная часть

Значение высоты первого элемента призматического слоя соответствует требованиям k -epsilon модели турбулентности. В результате численного расчёта величина параметра Y^+ не превышает 100, что говорит о корректной работе выбранной модели турбулентности. Общее количество элементов расчётной сетки составило приблизительно 5 млн.

Расчётная сетка направляющего аппарата (сегмент) модернизированной проточной части погружного насоса представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Расчётная сетка НА

В качестве граничных условий на входе в расчётную область задано полное давление, на выходе — массовый расход жидкости, соответствующий номинальному режиму работы насоса. На твёрдых стенках выполнено условие непротекания $V = 0$ м/с. Численные расчёты выполнялись с помощью стандартного решателя «CFX 17.2» [4].

В результате численного расчёта получены прогнозные напорные характеристики. Согласно полученным результатам численных расчётов, следует сделать вывод, что использование направляющего аппарата осевого типа позволяет получить более крутую напорную характеристику без уменьшения КПД в оптимальной точке.

Цифровые модели рабочего колеса и направляющего аппарата модернизированной проточной части погружного насоса приведены на рисунке 4. Напечатанные элементы модернизированной проточной части погружного насоса приведены на рисунке 5.

Изготовление элементов проточной части с применением 3D-печати

Вторым этапом исследовательской работы является 3D-печать рабочего колеса и направляющего аппарата осевого типа модернизированной проточной части погружного насоса.

Процесс изготовления элементов проточной части основан на технологии 3D-печати методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling) [5, 6]. Метод FDM подразумевает собой создание реальных трёхмерных объектов за счёт нанесения последовательных слоёв материала, повторяющих контуры цифровой модели. Технология аддитивного производства получила широкое распространение при создании реальных трёхмерных моделей в промышленном производстве.

В ходе 3D-печати элементов проточной части насоса в качестве материала выбран термопластик PLA (полилактид) как наиболее распространённый тип филамента с повышенными физико-химическими свойствами, такими как жесткость, прочность,

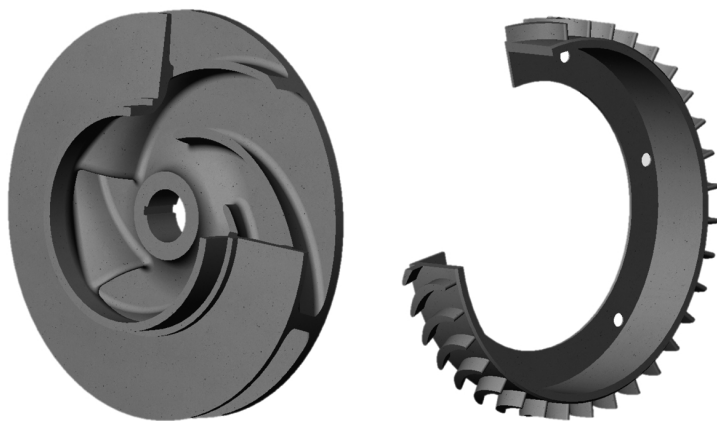


Рис. 4. Цифровая модель РК и НА



Рис. 5. Элементы проточной части после 3D-печати

влагопоглощение и другие [7, 8]. При использовании PLA филамента размеры изделий стабильны, то есть при охлаждении усадка деталей сводится к нулю. Ещё одним плюсом в выборе полилактида следует считать, что после завершения печати рабочие поверхности элементов проточной части остаются весьма точными, с минимальной величиной шероховатости, которые, за редким исключением, не требуются в механической обработке. Таким образом, перечисленные основные преимущества являются актуальными при исследовании напорных характеристик в данной работе.

Основные параметры 3D-печати элементов модернизированной проточной части погружного насоса приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры 3D-печати

Параметр	Значение
Тип филамента	PLA
Температура экструдера	205 °C
Температура стола	60 °C
Диаметр сопла экструдера	0,40 мм
Толщина слоя филамента	0,25 мм
Заполнение основных слоев	50 %
Заполнение слоев поддержки	15 %
Время печати каждого элемента проточной части	20 ч

После завершения 3D-печати выполнено удаление ненужного пластика (поддержки) и произведена механическая обработка, с заранее установленным припуском — точение наружного диаметра РК и НА, а также диаметра РК переднего уплотне-

ния с целью достижения повышенной точности данных поверхностей.

Натурные испытания со снятием напорных характеристик

Третьим и заключительным этапом исследовательской работы является проведение натурных испытаний погружного насоса со снятием напорных характеристик и анализ полученных результатов.

В работе испытания проводились по четырём вариантам исполнения проточной части с целью нахождения напорной характеристики с наиболее выраженным западанием.

Варианты исполнения проточной части при проведении испытаний погружного насоса приведены в таблице 3.

Таблица 3

Варианты исполнения проточной части

Вариант	Проточная часть
№ 1	РК и НА – существующие
№ 2	РК и НА – модернизированные
№ 3	РК – существующее, НА – модернизированный
№ 4	РК – существующее, НА – существующий и модернизированный

В ходе обработки данных, полученных при проведении натурных испытаний построены аппроксимирующие кривые (напорные характеристики).

Напорные характеристики натурных испытаний четырёх вариантов исполнения проточной части погружного насоса приведены на рисунке 6.

На основе полученных результатов, основанных на экспериментальных данных (см. рисунок 6), следует отметить, что на режимах больших подач удалось обеспечить наибольшее западание

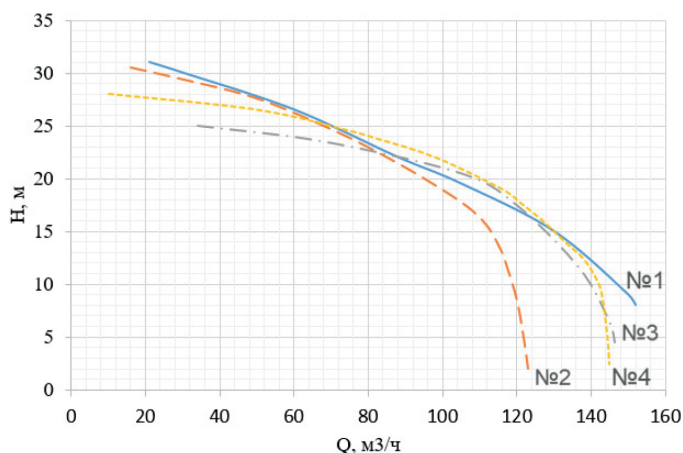


Рис. 6. Напорные характеристики

напорной характеристики при помощи применения модернизированной проточной части погружного насоса.

Выводы

1. При выполнении исследовательской работы метод изготовления элементов проточной части насоса с применением технологий 3D-печати оказался наиболее предпочтительным, чем традиционные методы в связи с существенным сокращением себестоимости и времени производства деталей, а также наличием возможности доработки опытных образцов с наименьшими затратами на этапе проектирования.

2. Результаты натурных испытаний показывают, что на режимах больших подач ($Q = 110–150 \text{ м}^3/\text{ч}$) удалось обеспечить западание напорной характеристики при использовании всех вариантов исполнения проточной части насоса относительно существующего (вариант № 1).

3. На указанных режимах работы насоса наиболее выраженное западание напорной характеристики имеет проточная часть с модернизированным РК и НА (вариант № 2).

Список литературы

1. **Смирнов В. В., Барзали В. В., Ладнов П. В.** Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности // Опыт ФГБОУ УГАТУ. Новости материаловедения. Наука и техника. — 2015. — № 2 (14). — С. 23–27.
2. **Ломакин А. А.** Центробежные и осевые насосы. — М. ; Л. : Машиностроение, 1966. — 364 с.
3. **Gulich J. F.** Centrifugal pumps. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. — 964 с.
4. **Пугачев П. В.** Расчёт и проектирование лопастных гидромашин. Расчёт вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX : учеб. пособие / П. В. Пугачев, Д. Г. Свобода, А. А. Жарковский. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 120 с.
5. **Бобцова С. В.** Исследование и разработка методов использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении : дис. канд. техн. наук. — СПб., 2005. — 124 с.
6. **Бойцов Б. В., Куприков М. Ю., Маслов Ю. В.** Повышение качества подготовки производства применением технологий быстрого прототипирования // Труды МАИ. — 2011. — Вып. 49. — С. 6.
7. **Бондарь А. Ю.** Исследование технологических параметров изготовления пластмассовых образцов с применением лазерной фотополимеризации : дис. канд. техн. наук. — Ижевск, 1998. — С. 5–11.
8. **Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.** Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. — М. : Техносфера, 2016. — 656 с.