

О методике прогнозирования напора двухъярусного рабочего колеса средней быстроходности ($n_s = 90$)

09, сентябрь 2015

Князева Е. Г.

УДК: 622.242.5

Россия, ООО «УК «Группа ГМС»

knyazeva@hms.ru

Введение

Зачастую доводка параметров насоса с целью получения параметров, отличающихся от номинальных значений серийно выпускаемых машин, является сложной задачей, требующей нестандартных решений. К примеру, в условиях ограничения радиальных габаритов проточной части насоса, применение двухъярусных рабочих колес позволяет увеличивать напор насоса (рисунок 1). Использование данного метода позволило создать несколько вариантов модернизированных проточных частей ряда насосов производства ОАО «Группа ГМС». Необходимость модернизации в короткие сроки на заданные параметры проточных частей для других насосов требует создания инженерной методики, которая позволит определять на этапе проектирования уровень повышения напора и изменения гидравлического к.п.д. центробежного насоса.

Проведение исследовательской работы

В данной статье приводятся результаты исследовательской работы для рабочего колеса насоса двустороннего входа быстроходностью $n_s=90$. С целью анализа зависимости изменения напора и гидравлического к.п.д. двухъярусного рабочего колеса была проведена серия многофакторных численных экспериментов (ЧЭ). При этом в качестве критериев (целевых функций) рассматривались изменения напора рабочего колеса (ΔH) и гидравлического к.п.д. ($\Delta \text{к.п.д.}$), а в качестве независимых варьируемых параметров – 7 геометрических параметров, характеризующих лопасть второго яруса:

- 1) радиусы входа лопасти по основному и покрывающему дискам $R_{1\text{доп_осн}}$ и $R_{1\text{доп_покр}}$ (рисунок 2);
- 2) относительное положение входа лопасти в межлопастном канале по основному и покрывающему дискам $\Delta_{1\text{доп_осн}}$ и $\Delta_{1\text{доп_покр}}$ (рисунок 2);
- 3) углы входа лопасти по основному и покрывающему дискам $\beta_{1\text{доп_осн}}$ и $\beta_{1\text{доп_покр}}$;
- 4) толщина лопасти на входе $\delta_{1\text{доп}}$.

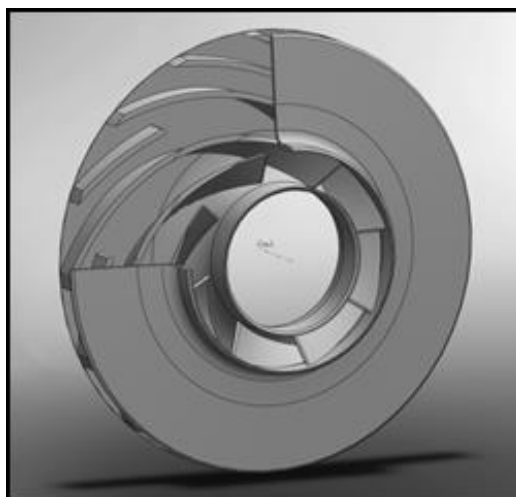


Рис. 1. Лопастная система двухъярусного рабочего колеса

Для минимизации потерь на входе в отвод на выходе из рабочего колеса желательно иметь максимально равномерное распределение полей скорости и давления. В связи с этим выходной участок лопасти второго яруса располагался посередине межлопастного канала и повторял геометрию лопастей основного яруса.

Интервал изменений указанных выше геометрические параметров был выбран следующим образом:

- 1) $R_{1 \text{ доп_осн/ доп_покр}} = R_{1 \text{ осн/ покр}} + [0,2 \dots 0,8](R_2 - R_{1 \text{ осн/ покр}})$, где $R_{1 \text{ осн/ покр}}$ – радиус входа лопасти основного яруса по основному/покрывающему диску;
- 2) $\Delta_{1 \text{ доп_осн/ доп_покр}} = [0,2 \dots 0,8]$ толщины межлопастного канала, отсчитывая от тыльной стороны лопасти основного яруса;
- 3) $\beta_{1 \text{ доп_осн/ доп_покр}} = \beta_{1 \text{ осн/ покр}} + [0,2 \dots 0,8](\beta_2 - \beta_{1 \text{ осн/ покр}})$, где $\beta_{1 \text{ осн/ покр}}$ – угол входа лопасти основного яруса по основному/покрывающему диску;
- 4) $\delta_{1 \text{ доп}} = [0,2 \dots 0,8] \delta_1$, где δ_1 – толщина входа лопасти основного яруса.

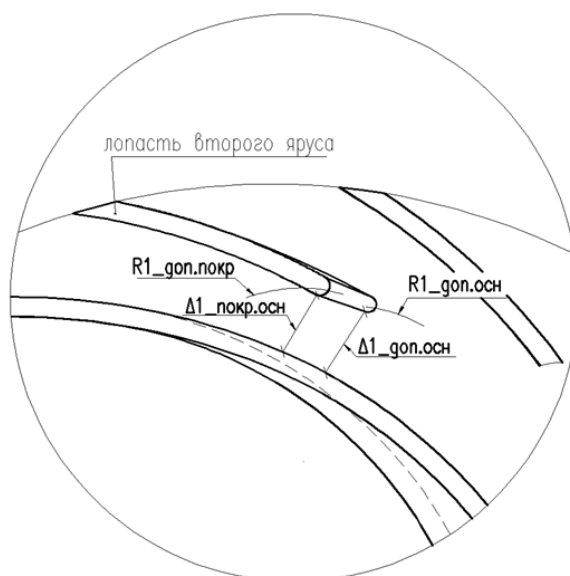


Рис. 2. Варьируемые геометрические параметры

Определение гидродинамических характеристик потока в рабочем колесе насоса для различных вариантов геометрии лопастей второго яруса проводилось численным методом при использовании программного комплекса ANSYS CFX (серия из 26 экспериментов). Для получения комбинаций геометрических параметров дополнительной лопасти был применен псевдослучайный набор чисел, полученных использованием ЛПт - последовательности. Среди известных в настоящее время последовательностей точек в K_n -мерном пространстве псевдослучайных точек лишь ЛПт - последовательность обладает свойством наиболее равномерно распределенной (неравномерности при всех N (случайных точек) ограничены) [1].

Поскольку в данном исследовании интерес представляли интегральные характеристики рабочего колеса, являющегося периодическим элементом вращения, расчетная модель рабочего колеса (рисунок 3) включала один межлопастной канал, сектор подвода и кольцевого безлопаточного диффузора за рабочим колесом. На входе в подвод указывались значения радиальной и окружной скоростей, обеспечивающие требуемый расчетный режим по подаче и момент скорости на выходе из полуспирального подвода. Расчет проводился для номинального режима насоса, в стационарной постановке. Рабочая среда (вода при 25°C) полагалась вязкой, несжимаемой, режим течения – турбулентный. Для моделирования турбулентных течений использовалась стандартная k - ϵ модель турбулентности.

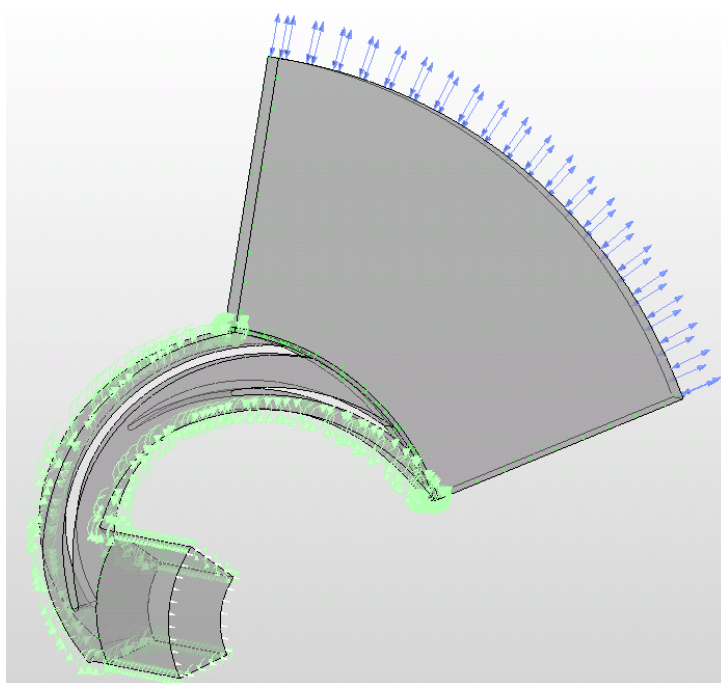


Рис. 3. Расчетная модель

Результаты проведенных экспериментов в виде поля решений показаны на рисунке 4.

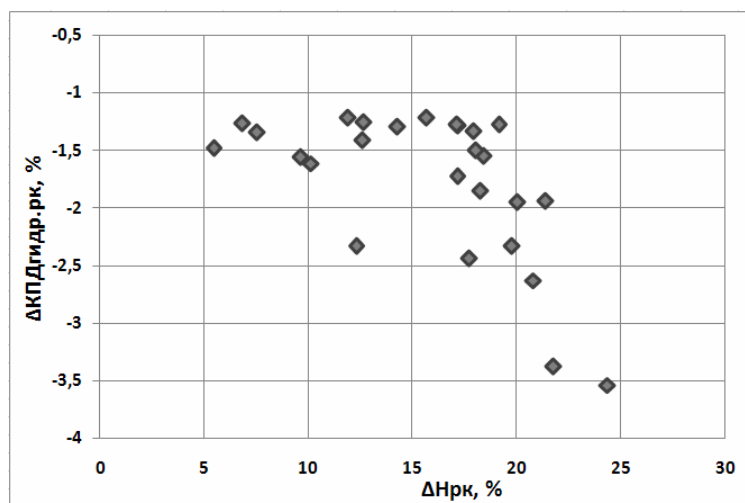
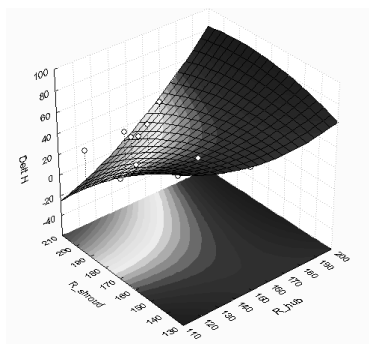
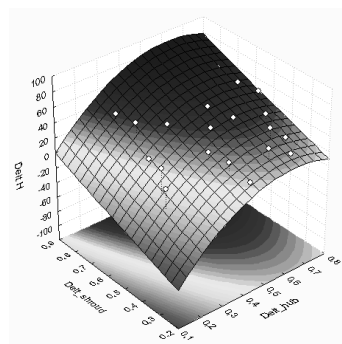


Рис. 4. Поле полученных решений

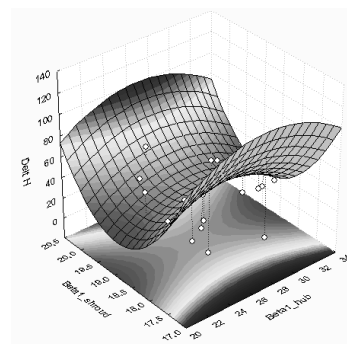
Анализ полученных данных показал, что увеличение напора колеблется от 5 до 24%, при этом гидравлический к.п.д. снижается от 1,2 до 3,5% (максимальное снижение к.п.д. наблюдается для варианта с максимальным повышением напора).



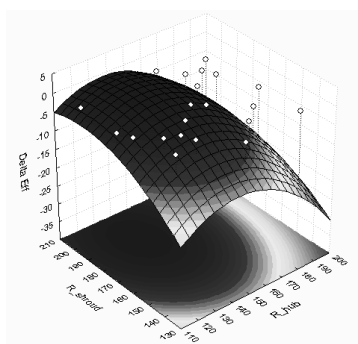
Зависимость напора от радиуса входа лопасти по основному и покрывающему диску



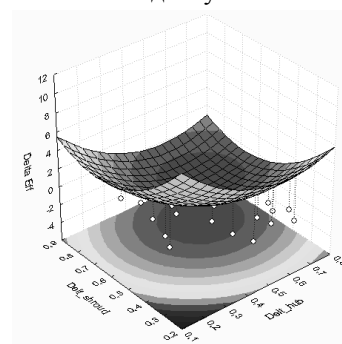
Зависимость напора от относительного положения входа лопасти в межлопастном канале по основному и покрывающему диску



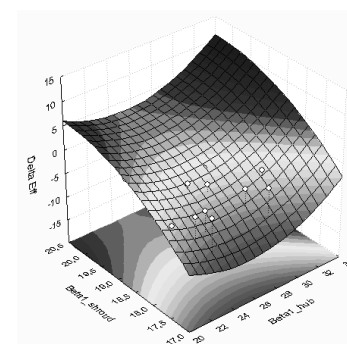
Зависимость напора от угла входа лопасти по основному и покрывающему диску



Зависимость гидр. к.п.д. от радиуса входа лопасти по основному и покрывающему диску



Зависимость гидр. к.п.д. от относительного положения входа лопасти в межлопастном канале по основному и покрывающему + диску



Зависимость гидр. к.п.д. от угла входа лопасти по основному и покрывающему диску

Рис. 5. Графический анализ результатов серии из 26 ЧЭ

Из сравнения зависимостей ΔH и $\Delta \text{к.п.д.}$ от геометрических параметров (рисунок 5, 6) следует:

- уменьшение радиуса входа лопасти по покрывающему диску и увеличение радиуса входа лопасти по основному диску приводит одновременно к большему уровню повышения напора и меньшей потери гидравлического к.п.д.;
- минимальное падение к.п.д. при относительно высоком уровне повышения напора наблюдается в том случае, если лопасть на входе будет смещена в межлопастном канале на 60% от тыльной стороны по основному диску и на 70% по покрывающему диску, что связано с перераспределением скорости основного потока вдоль межлопастного канала от тыльной стоны лопасти к рабочей;
- чем меньше угол входа лопасти по покрывающему диску, тем выше уровень напора при минимальных гидравлических потерях, при этом роль угла входа лопасти по основному диску менее существенна;

влияние толщины лопасти на входе на уровень изменения напора и кпд является незначительным.

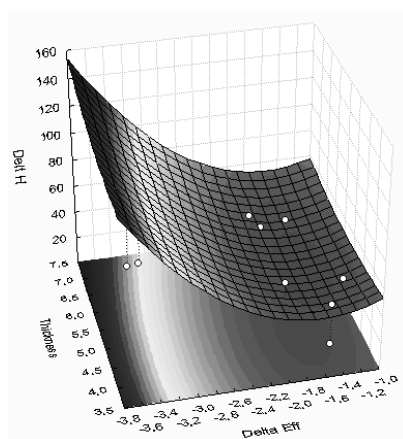


Рис. 6. Зависимость изменений напора и к.п.д. от толщины лопасти на входе

С целью определения аналитической зависимости по данным серии ЧЭ был использован метод регрессионного анализа [2], на основе которого получены следующие уравнения множественной регрессии, устанавливающие связь между изменением напора/к.п.д. и описанными выше геометрическими параметрами лопасти второго яруса:

1) уравнение регрессии для изменения напора:

$$\Delta H = 32.83 - 0.0705R_{1\text{доп_осн}} - 0.14R_{1\text{доп_покр}} + 48.68 \Delta_{1\text{доп_осн}} + 51.5 \Delta_{1\text{доп_покр}} - 0.47\beta_{1\text{доп_осн}} + 0.0857\beta_{1\text{доп_покр}} + 0.0941\delta_{1\text{доп}}$$

Статистический анализ полученного уравнения регрессии показал следующее:

- средняя ошибка аппроксимации: $A = 13,66\%$;
- оценка среднеквадратичного отклонения: $S = 6,17$;
- индекс множественной корреляции равен: $R = 0,918$;
- коэффициент детерминации: $R^2 = 0.912 = 0.843$.

Таким образом, связь между изменением напора ΔH и геометрическими факторами дополнительной лопасти сильная и полученное уравнение регрессии хорошо описывает фактические данные и факторы сильно влияют на результат.

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии, которая основывалась на использовании F-критерия Фишера, показала, что уравнение регрессии для ΔH статистически надежно, поскольку фактическое значение F-критерия, равное $F=13,82$, больше критического значения $F_{кр}=2,58$, то есть коэффициент детерминации статистически значим.

2) уравнение регрессии для изменения к.п.д.:

$$\Delta \text{к.п.д.} = 0.0207 + 0.00366R_{\text{Iдоп_осн}} + 0.00346R_{\text{Iдоп_покр}} - 2.2\Delta_{\text{Iдоп_осн}} - 2.06\Delta_{\text{Iдоп_покр}} + \\ + 0.0173\beta_{\text{Iдоп_осн}} - 0.0539\beta_{\text{Iдоп_покр}} - 0.0402\delta_{\text{Iдоп}}$$

Статистический анализ полученного уравнения регрессии показал, что:

- средняя ошибка аппроксимации: $A = 18,36\%$;
- оценка среднеквадратичного отклонения: $S = 0,46$;
- индекс множественной корреляции равен: $R = 0,836$;
- коэффициент детерминации: $R^2 = 0.912 = 0.7$.

Таким образом, связь между изменением напора $\Delta \eta_{\text{гидр}}$ и геометрическими факторами дополнительной лопасти сильная и полученное уравнение регрессии хорошо описывает фактические данные и факторы сильно влияют на результат.

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии, которая основывалась на использовании F-критерия Фишера, показала, что

уравнение регрессии для $\Delta \eta_{\text{гидр}}$ статистически надежно, поскольку фактическое значение F-критерия, равное $F=6,32$, больше критического значения $F_{кр}=2,54$, то есть коэффициент детерминации статистически значим.

Заключение

На основе приведенных данных можно заключить следующее:

Анализ результатов расчета показал, что ведение второго яруса лопастей позволяет увеличить напор рабочего колеса ($n_s=90$) до 24%, при этом падение к.п.д. составляет в среднем 1,8%.

На основе серии численных экспериментов были построены статистически надежные регрессионные уравнения для двух целевых функций (напора и гидравлического к.п.д.) в зависимости от семи геометрически независимых параметров дополнительной лопасти, которые позволяют проводить прогнозирование повышения напора рабочего колеса и изменения гидравлического к.п.д. со средней ошибкой аппроксимации, равной 1,75%.

Результаты данной работы дают основание для продолжения данного направления расчетно-экспериментальных работ для ряда других n_s и анализа возможности создания

обобщенной методики прогнозирования изменения напора и гидравлического к.п.д. двухъярусного рабочего колеса.

Список литературы

- [1]. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука. 1973. 311 с.
- [2]. Онлайн-калькулятор: уравнение множественной регрессии. / Сайт Semestr.ru. Режим доступа: <http://math.semestr.ru/regress/corel.php> (дата обращения: 21.09.2015).