

З графіка видно, що при збільшенні тиску на вході в підвідне сопло, КПД турбіни збільшується, та оптимум по КПД зміщується в сторону збільшення наведеної колової швидкості робочого колеса.

#### Список використаних джерел

1. Ванев С.М., Королев С.К. Использование струйно-реактивной турбины в системах редуцирования природного газа // Вестник НТУУ «КПИ»: Машиностроение. - 1999. - Вып.35. - С. 76-83.
2. С. М. Ванев, В. В. Гетало, С.К. Королев. Исследование струйно-реактивной турбины для турбодетандерного агрегата // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, тематичний випуск «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». - 8'2012, №8, С. 82-90.
3. С.М. Ванев, В.В. Гетало, А.С. Бережной, С.К. Королев. Создание турбодетандерного агрегата ТДА-СРТ-100 со струйно-реактивной тягой // Газотурбинные технологии. - 2014. - №1(120). - С. 40-43.
4. С.М. Ванев, В.В. Гетало, А.С. Бережной, С.К. Королев. Создание турбодетандерного агрегата ТДА-СРТ-100 со струйно-реактивной тягой // Газотурбинные технологии. - 2014. - №2(121). - С. 34-37.
5. Sergej Vaneyev, Viktor Getalo. Jet-Reactive Turbine: Experimental Researches and Calculations by Means of Softwares // Applied Mechanics and Materials. – 2014. - Volume 630. - Pages 66–71.
6. Ванев С.М., Королев С.К. Исследование турбодетандерного агрегата на базе струйно-реактивной турбины мощностью 100 кВт // Сборник научных трудов «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». - Харьков. - 2003. - С. 293-296.
7. Ванев С.М. Структура потерь энергии и КПД струйно-реактивной газовой турбины // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки, № 9(30)-10(31) – Суми:2001.–С. 207-214.
8. Расчет оптимальной окружной скорости рабочего колеса струйно-реактивной турбины [Текст] / С. М. Ванев, С. К. Королев, А. С. Бережной // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2009. — №4. — С. 22-29.

УДК 621.671

**Косторной С. Д.** д.т.н., проф., **Косторной А. С.** к.т.н., **Хатунцев А. Ю.** к.т.н.,  
**Бондарев А. О.**

АО «ВНИИАЭН» Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного и энергетического насосостроения, г. Сумы, Украина

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВХОДНОЙ КРОМКИ ЛОПАСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА НА НАПОРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ

*Существенное влияние на напорную и энергетическую характеристику оказывает форма лопасти рабочего колеса. В работе методом граничных элементов проведено моделирование влияния положения входной кромки лопасти рабочего колеса на его напорную характеристику. Используется модель вихревого течения идеальной несжимаемой жидкости в рабочем колесе. Результаты вычислительного эксперимента сравниваются с экспериментальными данными, полученными ранее в АО «ВНИИАЭН». Физический эксперимент проводился для ступени центробежного насоса, вычислительный – для рабочего колеса с безлопаточным диффузором. Получено качественное и количественное согласование результатов.*

*Ключевые слова: вихревое течение, идеальная жидкость, напор, рабочее колесо центробежного насоса, метод граничных элементов.*

Усовершенствование лопастной системы рабочего колеса для повышения напора ступени насоса является актуальной задачей при модернизации и разработке насосов с повышенными характеристиками именно по напору. В данной работе исследовалась эффективность применения метода граничных элементов при моделировании влияния положения входной кромки лопасти рабочего колеса на его напорную характеристику. Исследовались рабочие колеса (РК) с двумя различными меридианными сечениями и различным положением входных кромок лопастей - РК1 и РК2 (меридианное сечение 1), РК3 и РК4 (меридианное сечение 2) (рис. 1). В рабочих колесах РК1 и РК3 входная кромка сдвинута ко входу.

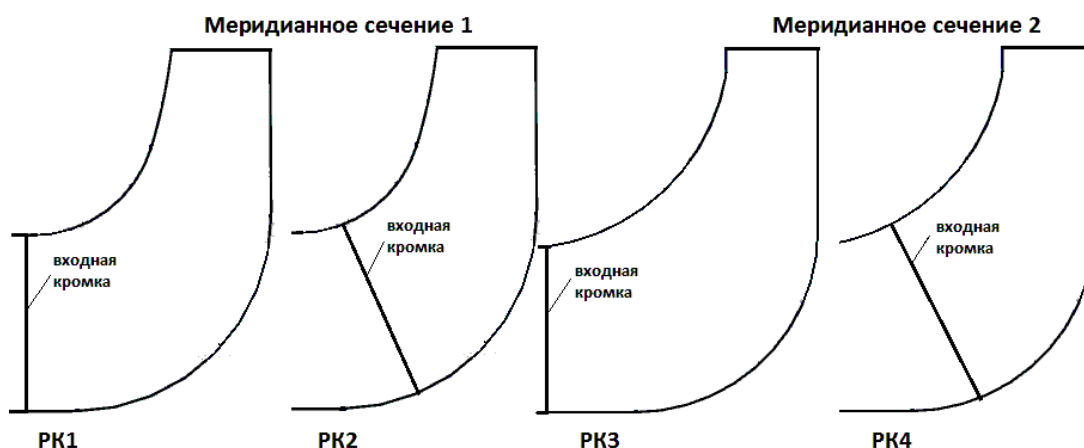


Рис. 1 – Меридианные сечения исследуемых рабочих колес с различным расположением входных кромок лопастей

Метод граничных элементов эффективен для расчета напорных характеристик рабочих колес центробежных насосов [1]. Моделировалось течение идеальной вихревой несжимаемой жидкости, на основе которого рассчитывалась напорная характеристика. Алгоритм и методика более подробно рассмотрены в работе [2].

Результаты вычислительного эксперимента сравнивались с экспериментальными данными, полученными ранее в АО «ВНИИАЭН». Физический эксперимент проводился для ступени центробежного насоса, вычислительный – для рабочего колеса с безлопаточным диффузором.

#### Решение прямой задачи методом граничных элементов

Прямая 3D задача течения в рабочем колесе центробежного насоса решалась с учетом взаимного влияния элементов проточной части. Задача решается в дискретные моменты времени. Используется модель вихревой идеальной несжимаемой жидкости для стационарного течения:

$$\begin{aligned} (V \cdot \nabla)V &= F - \frac{1}{\rho} \text{grad } p, \\ \text{div}V &= 0, \text{rot}V \neq 0. \end{aligned}$$

Рассматривается течение в рабочем колесе центробежного насоса с безлопаточным диффузором. Поверхность рабочего колеса, входное и выходное сечения представляется непрерывной системой граничных особенностей – вихревых рамок [3, 4]. Расчетная схема приведена на рис. 2.

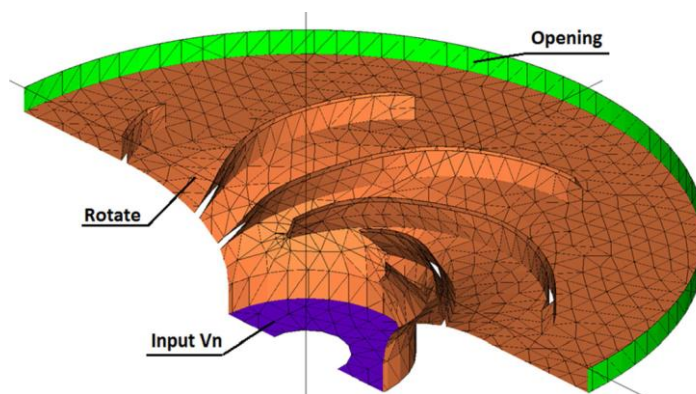


Рис. 2 – Расчетная схема рабочего колеса с безлопаточным отводом для метода граничных элементов

Основная гидродинамическая особенность – вихревой диполь  $Y$  [5, 6], равномерно распределенный по площади рамки  $S$ :

$$W(r_0) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{3(r-r_0)[Y \cdot (r-r_0)] - Y(r-r_0)^2}{|r-r_0|^5} ds,$$

$$\text{rot}W(r_0) = \int_S Y \times \nabla \delta(r) ds \neq 0,$$

$$\text{div}W(r_0) = 0.$$

### Вычисление величины напора

Для определения напора, создаваемого рабочим колесом, на основе решения прямой 3D задачи, вычисляется осредненный по окружности и высоте выходного сечения момент абсолютной скорости на выходе из рабочего колеса.

Величина прогнозируемого напора определялась по формуле Эйлера [7]:

$$\begin{aligned} H &= H_2 - H_1, \\ H_1 &= VuR_1 \cdot \omega / g, \\ H_2 &= VuR_2 \cdot \omega / g, \end{aligned}$$

где

$\omega$  – угловая скорость вращения рабочего колеса;

$g$  – ускорение свободного падения;

$VuR_1$  – осредненный момент абсолютной скорости на входе в рабочее колесо;

$VuR_2$  – осредненный по окружности и высоте момент абсолютной скорости на выходе из рабочего колеса.

### Результаты

Расчетные поля абсолютных и относительных скоростей, используемые для определения расчетной величины напора в рабочем колесе, изображены на рис. 3. На рис.4 приведены результаты сравнения величин напора по результатам численного эксперимента, выполненного в программном обеспечении собственной разработки, с экспериментальными данными.

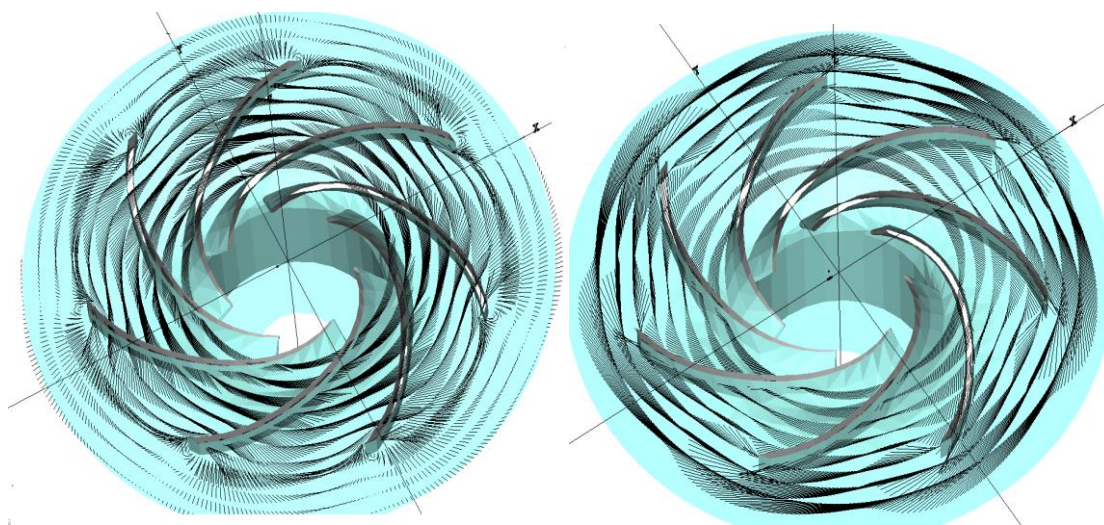


Рис. 3 – Расчетные поля абсолютных и относительных скоростей в рабочем колеса

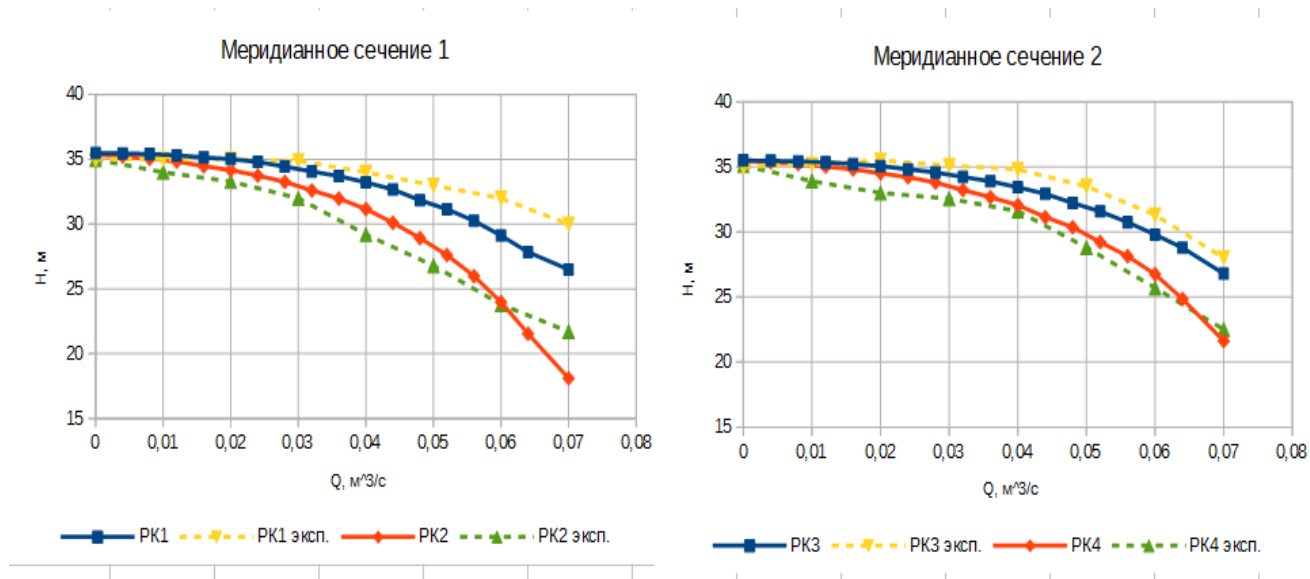


Рис. 4 – Сравнение экспериментальных (штриховые линии) и расчетных (сплошные линии) величин напора

### Выводы

Расчетные результаты качественно согласуются с результатами физического эксперимента. Максимальное отклонение составляет 15%.

Численный эксперимент на основе метода граничных элементов позволяет получить экспериментальный результат повышения кривой напорной характеристики для рабочих колес РК1 и РК3, со сдвинутой ко входу входной кромкой лопасти, по сравнению с рабочими колесами РК2 и РК4.

Количественные отличия предположительно вызваны тем, что физический эксперимент был проведен для ступени центробежного насоса, а вычислительный эксперимент проводился в постановке: только рабочее колесо с безлопаточным диффузором.

### Список литературы

1. Давиденко, А.К. Прогнозирование напора рабочего колеса на основе метода граничных элементов / А.К. Давиденко, А.Ю. Хатунцев // Вестник НТУУ «КПИ». Серия машиностроение. - 2016. - Вып.2 (77) – С.94– 99.
2. Давиденко, А.К. Расчет напорной характеристики центробежного насоса методом гидродинамических особенностей / А.К. Давиденко, А.С. Косторной, А.Ю. Хатунцев // Сб. Моделирование и информационные технологии. – 2018. – №.82. – С.102-110.
3. Косторной, С.Д. Математическое моделирование и расчет трехмерного невязкого течения жидкости в лопастных гидромашинах осевого типа с целью определения их силовых и моментных характеристик / С.Д. Косторной, А.К. Давиденко // Вест. Нац. Техн. Ун-та Украины «Киев, политехн. ин-т»: серия «Машиностроение». – 1999.– № 36. – Т. 2. – С. 487– 494.
4. Косторной, С.Д. Расчет пространственного потока в рабочем колесе поворотно-лопастных гидротурбин осевого типа. Часть 1 – Моделирование пространственного течения / С.Д. Косторной, А.К. Давиденко // Вісник Сумського державного університету. – 1996. – №2(6). – С. 41– 46.
5. Сеффмен, Ф. Дж. Динамика вихрей / Ф. Дж. Сеффмен. – Москва : Науч. Мир, 2000. – 367 с.
6. Дынникова, Г.Я. Расчет трехмерных течений несжимаемой жидкости на основе дипольного представления завихренности. // ДАН. 2011. Т. 437, №1. – С.35-38.
7. Этинберг, И.Э. Гидродинамика гидравлических турбин / И.Э. Этинберг, Е.С. Раухман – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.