

УДК 533.601

**В.Н. ГОЛОЩАПОВ**, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України, Харьков;  
**С.В. АЛЁХИНА**, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України, Харьков;  
**О.А. СИМБИРСКАЯ**, аспирант ИПМаш НАН України, Харьков

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМСЯ ДИСКОМ И НЕПОДВИЖНОЙ СТЕНКОЙ

Исследована структура потока рабочей среды в зазоре между вращающимся диском и неподвижной стенкой при изменении величины зазора в диапазоне 1,8–5,8 мм, что соответствует значению переднего придискового зазора в ступенях ЦВД и ЦСД паровых турбин.

**Ключевые слова:** кольцевой радиальный диффузор, вращающийся диск, зазор, статическое давление, радиальная и тангенциальная составляющие скорости.

#### Введение

Течение пара в зазоре между боковыми поверхностями дисков ротора и диафрагмами статора турбины можно рассматривать как течение пара в радиальном кольцевом диффузоре. Анализ опубликованных исследований, расчетов и экспериментов показал, что пока не существует достаточно достоверного метода расчета характеристик таких течений, особенно в диффузорах с вращающейся стенкой [1–4]. Особенностью этого вида течений является то, что вращение ротора вызывает движение рабочей среды, находящейся возле диска, от оси вращения к периферии, под действием центробежной силы. При вращении диска в ограниченном пространстве возникает циркуляционное движение при отсутствии расхода через диффузор. Более сложную структуру движущегося от центра к периферии потока, создает расход рабочей среды через зазор, образованный диском и неподвижной стенкой.

Результаты исследования течений, используемые в практике турбостроения [2–5], относящиеся к определению структуры потока в кольцевом радиальном диффузоре преимущественно являются экспериментальными, и проведены на упрощенных моделях, полностью не отражающих реальную геометрию исследуемого объекта. Современные численные методы и реализованные на их основе программные комплексы позволяют моделировать трехмерные вязкие турбулентные течения, в том числе такие явления в них, как отрывные течения, вихревые зоны и другое.

Цель данного исследования – верификация компьютерной модели для идентификации структуры движения рабочей среды в зазоре между вращающимся диском и неподвижной стенкой в условиях отсутствия расхода через зазор.

Для проведения численных исследований была построена конечно-элементная модель, которая представляла собой кольцевой радиальный диффузор диаметром 400 мм, с неподвижной стенкой и вращающимся диском (рис. 1). На периферии диффузора его кольцевая щель перекрыта осевым усиком уплотнения длиной 1 мм, который вместе с неподвижным корпусом образует кольцевую щель шириной 0,5 мм. Зазор  $S$  между диском и неподвижной стенкой изменялся в пределах 1,8–5,8 мм, с образованием выступа на периферии стенки высотой 5 мм для зазоров  $S > 1,8$  мм.

Численный эксперимент проводился при отсутствии расхода через зазор и частоте вращения ротора 50, 3000 и 5000 об/мин.

Математическая модель рассматриваемого процесса включала в себя следующие уравнения:

---

© В.Н. Голощапов, С.В. Алёхина, О.А. Симбирская, 2013

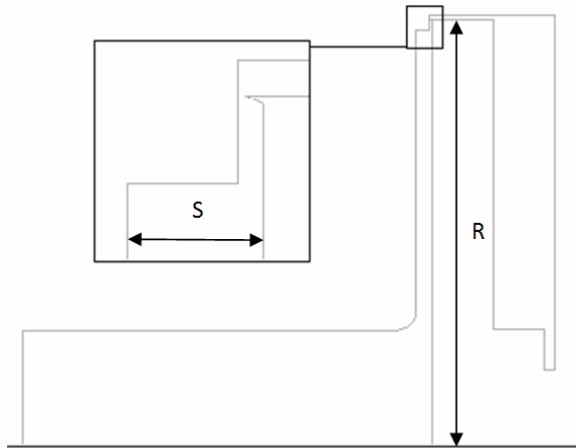


Рис. 1 – Расчетная область

барометрическое давление на входе и выходе.

- неразрывности (источники и стоки массы отсутствуют);
- количества движения вязкой жидкости Навье-Стокса;
- энергии (для воздуха).

Для замыкания система дифференциальных уравнений дополняется уравнением состояния идеального газа. Для вычисления турбулентных составляющих, входящих в уравнение Навье-Стокса и уравнение энергии, использовалась модель турбулентности «SST»  $k-\omega$ . В качестве граничных условий задавалось

### Результаты расчета

В качестве характеристик потока в ходе численного исследования рассматривались профили радиальной и тангенциальной составляющих скорости потока по ширине зазора. На рис. 2 и рис. 3 для относительного зазора (величина зазора, отнесенная к радиусу)  $\bar{S} = 0,009$  и  $\bar{S} = 0,029$  представлено распределение радиальной и тангенциальной составляющих скорости на радиусах  $\bar{R} = 0,5$  и  $\bar{R} = 0,95$ .

Результаты расчетов показали, что для всего диапазона исследованных величин зазоров  $0,009 \leq \bar{S} \leq 0,029$  характер течения рабочей среды остается подобным.

Профиль радиальной составляющей скорости по ширине зазора имеет максимум, смещенный в сторону стенки диска, а у поверхности стенки крышки возникают обратные токи. На малых радиусах течение среды имеет близкий профиль с противоположным направлением, принимая значение  $V_r = 0$  в средней части зазора ( $z/S \approx 0,5$ , где  $z$  – текущая координата). Чем больше величина зазора и чем выше частота вращения диска, тем больше максимум скорости смещен к поверхности диска.

Профиль тангенциальной составляющей скорости имеет максимум на поверхности диска. При увеличении зазора ( $\bar{S} = 0,019$ ) формируется четко выраженное ядро потока.

На периферии диффузора на профили скорости оказывает влияние вихревое течение у кромки неподвижной стенки и зубца диска, а также поворот потока к неподвижной стенке.

Зависимость распределения статического давления по радиусу диска от частоты вращения диска для зазоров относительной шириной 0,009 и 0,029 представлена на рис. 4. По оси абсцисс отложен радиус зазора, по оси ординат – изменение статического давления по радиусу.

Статическое давление по ширине зазора постоянное ( $P_{ст}(z) = const$ ), что соответствует результатам экспериментальных исследований [2, 3, 5].

### Выводы

Анализ изменения радиальной и тангенциальной составляющих скорости показал, что форма профиля  $V_r$  и  $V_t$  соответствует результатам экспериментальных исследований разных авторов.

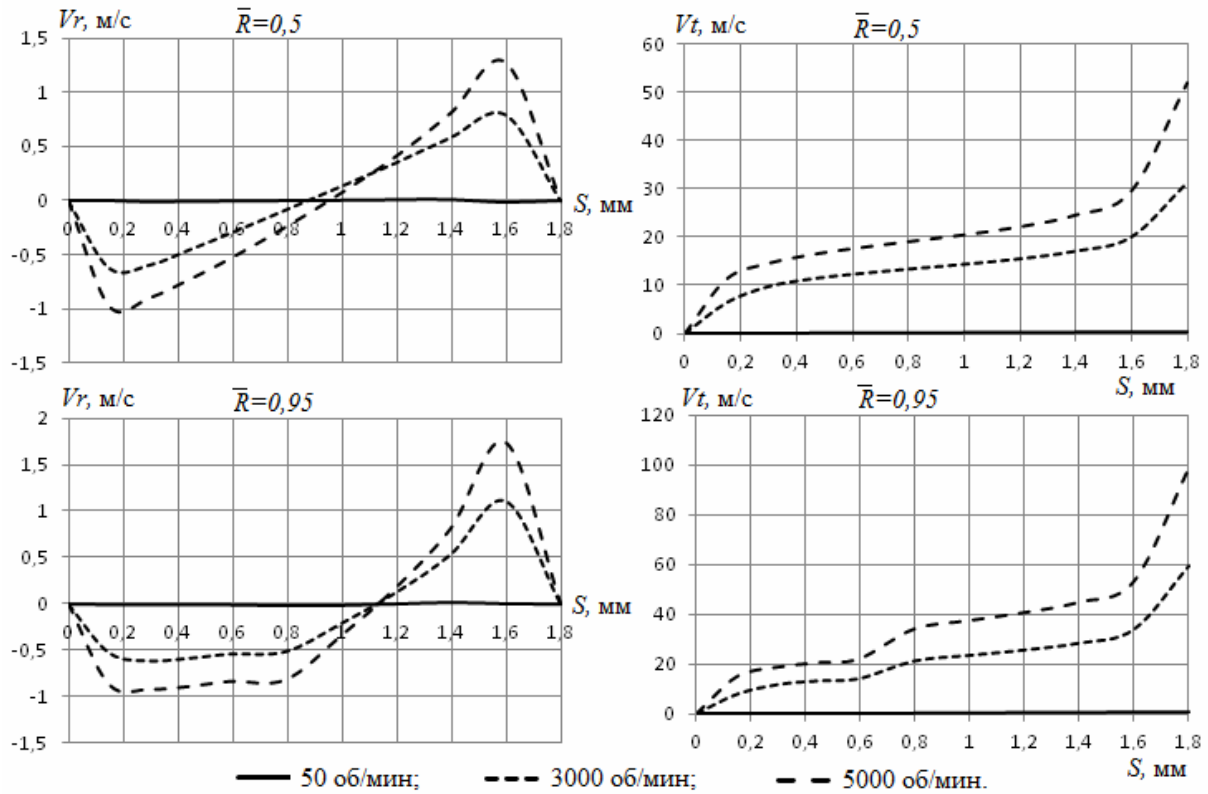


Рис. 2 – Профіли радіальної та тангенціальної складових швидкості потоку по ширині зазора ( $\bar{S} = 0,009$ ) на радіусах  $\bar{R} = 0,5$  і  $\bar{R} = 0,95$  при частоті вращення диска 50, 3000 і 5000 об/мин

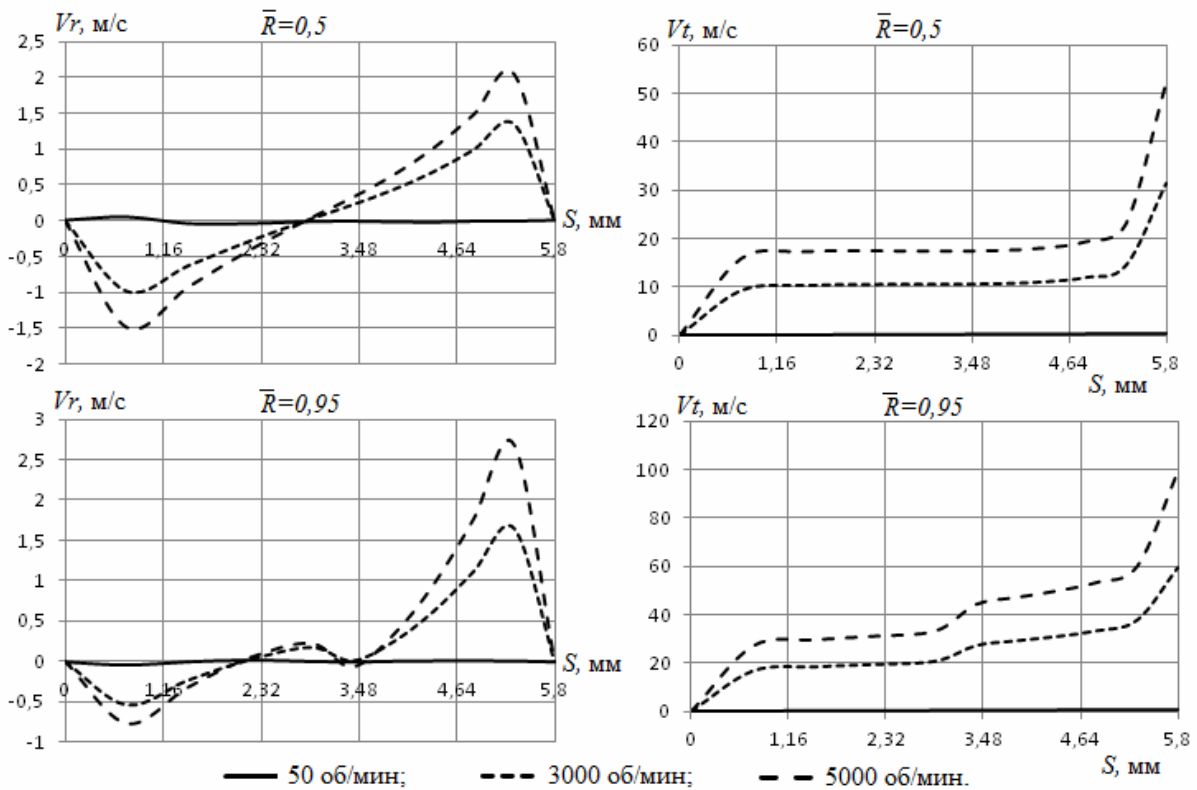


Рис. 3 – Профіли радіальної та тангенціальної складових швидкості потоку по ширині зазора ( $\bar{S} = 0,029$ ) на радіусах  $\bar{R} = 0,5$  і  $\bar{R} = 0,95$  при частоті вращення диска 50, 3000 і 5000 об/мин

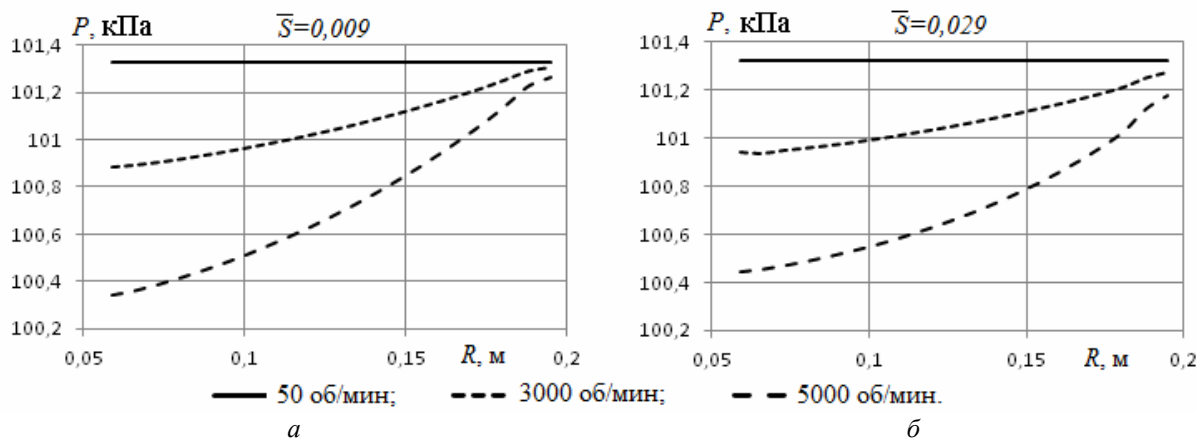


Рис. 4 – Розподілення статического тиску на нерухомій стінці вдоволь радіуса для зазорів відносної ширини 0,009 (а) і 0,029 (б)

Аналіз розподілення статического тиску по радіусу нерухомої стінки і відсутності расхода робочої середви в зазорі показав, що розподілення  $P_{ст}$  також достатньо хорошо коррелює з відомими дослідженнями других авторів.

Моделювання руху робочої середви в зазорі, утвореному нерухомою стінкою і вращаючимся диском, з допомогою тривимірної моделі течення вязкої середви показало можливість і цілесобразність використання данної моделі для дослідження структури потоку і розподілення характеристик течення в придискових зазорах турбінних ступеней.

**Список літератури:** 1. Швец, И.Т. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин [Текст] / И.Т. Швец, Е.П. Дыбан. – К.: Наукова думка, 1974. – 487 с. 2. Седач, В.С. Коэффициенты расхода при течении через разгрузочные отверстия в дисках паровых турбин [Текст] / В.С. Седач // Паровые и газовые турбины. – 1960. – № 2. – С. 117-131. 3. Седач, В.С. Влияние расхода через полость между вращающимся диском и стенкой на распределение давления по радиусу [Текст] / В.С. Седач, В.Н. Голощапов // Энергетическое машиностроение. – 1967. – № 4. – С. 51-58. 4. Морозов, Б.И. Экспериментальное исследование протечек в ступенях турбины [Текст] / Б.И. Морозов // Труды МЭИ. – 1957. – Вып. 28. – С. 27-35. 5. Бондаренко, Г.А. Исследование гидродинамики потока между корпусом и дисками рабочих колес турбомашин [Текст] / Г.А. Бондаренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 4(18). – С. 37-40.

Поступила в редакцию 15.01.13

УДК 533.601

**Моделювання потоку робочої середви в зазорі між вращаючимся диском і нерухомою стінкою** [Текст] / В.Н. Голощапов, С.В. Алёхина, О.А. Симбирская // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 13(987). – С. 30-33. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X.

Досліджена структура потоку робочого середвища в зазорі між диском, що обертається, і нерухомою стінкою при зміні величини зазору в діапазоні 1,8–5,8 мм, що відповідає значенню переднього придискового зазору в ступенях ЦВТ і ЦСТ парових турбін.

**Ключові слова:** кільцевий радіальний дифузор, обертовий диск, зазор, статичний тиск, радіальна і тангенціальна складові швидкості.

The structure of operating medium flow in the gap between the rotating disk and the stationary wall when the gap is in the range of 1,8–5,8 mm, which corresponds to the front neardisk's gap in the stages of HPC and MPC steam turbines was investigated.

**Keywords:** annular radial diffuser, rotating disk, gap, static pressure, radial and tangential velocity components.