

Специфической конструктивной особенностью полуоткрытого осерадиального рабочего колеса (РК) является зазор между торцами его лопаток и неподвижным покрывным диском. Наличие этого зазора оказывает значительное влияние на характеристику РК, которое может быть выражено снижением КПД РК на 18 %, и на характеристику ступени, что требует учета его при разработках проточной части компрессоров и расчета их характеристик. Цель настоящей работы – изучение структуры потока численным методом в полуоткрытом РК при различных величинах зазора между торцами лопаток и неподвижным покрывным диском для определения характера и степени влияния зазора на характеристику РК. В качестве объекта исследования выбрана ступень мультипликаторного центробежного компрессора с осерадиальным полуоткрытым РК, имеющим наружный диаметр РК $D_2 = 0,3$ м, угол выхода лопатки $\beta_{л2} = 50^\circ$, с лопаточным диффузором и кольцевой сборной камерой. Условный коэффициент расхода $\Phi_0 = 0,055$ и коэффициент полного напора $y^* = 0,58$, соответствуют оптимальному режиму работы [1]. Геометрическая модель, необходимая для создания расчетной модели в программе Flow Vision, состояла из трех звеньев: входного аппарата осевого типа, РК и лопаточного диффузора и представляла осесимметричный сектор с одной лопаткой РК и диффузора. Применительно к рассматриваемой задаче в программе Flow Vision выбрали модель расчета «Полностью сжимаемая жидкость», SST модель турбулентности. Сжимаемый газ – воздух. Частота вращения РК соответствовала частоте вращения при экспериментальном исследовании. На выходе из ступеней задавали массовый расход, приведенный к площади поперечного сечения канала и соответствующий производительности ступени на данном режиме. Численный эксперимент проведен при числе Маха - $Mu_2 = 1$, коэффициентах расхода $\varphi_{r2} = Cr_2/u_2 = 0,225 \dots 0,33$ и величинах зазора $\delta = 0-4$ мм. На основе расчетных данных строились графики зависимости коэффициента теоретического напора $\varphi_{u2} = Cu_2/u_2$ от коэффициента расхода φ_{r2} . В результате проведенного численного эксперимента, в соответствии с оговоренными условиями, получены результаты для пяти вариантов моделей РК (см. таблицу), отличающихся величиной зазора δ .

Номер варианта	Состояние покрывного диска	Зазор, мм	Вращается
0	2	Не вращается	3
0,8	4	1,6	5
4	1,6	5	4

Каждый вариант рассчитан при трех-четырёх значениях φ_{r2} . Графики функций $\varphi_{u2}/\varphi_{u2}(2 \text{ вар}) 0,050 = f(\varphi_{r2})$, где $\varphi_{u2}(2 \text{ вар}) 0,050$ - φ_{u2} для варианта №2 при $\Phi_0 = 0,050$, построенные по результатам расчетов для всех вариантов по величине зазора, представлены на рис. 1. Для выяснения характера влияния зазора на эффективность полуоткрытого РК необходимо установить наличие или отсутствие потерь расхода и потерь напора. Потери расхода от перетечки должны проявляться в виде обратных, от сечения 2-2 к сечению 1-1 РК, токов в зазоре между торцами лопаток и покрывным диском. Рис. 1 - Графики функций $\varphi_{u2}/\varphi_{u2}(2 \text{ вар}) 0,050 = f(\varphi_{r2})$,

построенные по результатам расчетов для вариантов №1-№5 по величине зазора. По мнению авторов [2, 3] такая форма потерь должна иметь место в полуоткрытых РК. Однако проведенное исследование показало их отсутствие. На рисунках 2 и 3 приведены полученные в результате трехмерного расчета проекции на меридиональную плоскость векторов скоростей потока в канале РК для вариантов №1 и №5, в которых признаков обратных токов в обоих случаях не наблюдается; проекции векторов скоростей в пределах зазоров направлены от сечения 1-1 к сечению 2-2 РК. Потери напора обусловлены перетеканием газа из канала в канал в направлении обратном вращению РК под действием перепада давлений на сторонах лопатки и трением о неподвижный покрывной диск. Из детального анализа потока в РК при наличии зазора имеют место значительно большие проекции скоростей в направлении, обратном вращению РК, особенно в зазоре. Это свидетельствует о том, что при наличии зазора и неподвижного покрывного диска часть потока в канале РК совершает движение в направлении, обратном его вращению. Вследствие чего происходит «раскрутка» потока, векторы скоростей отклоняются в сторону, обратную вращению, угол вектора относительной скорости уменьшается, и коэффициент напора падает. Таким образом, по вопросу о характере влияния материалы проведенного исследования склоняют в пользу версии авторов [4, 5] о том, что наличие зазора между торцами лопаток и неподвижным покрывным диском полуоткрытого РК приводит только к потере напора. Для исследования зависимости потерь напора от величины зазора и других сопутствующих факторов рассчитаны характеристики φ_2/φ_2 (2 вар) $0,050 = f(\varphi r_2)$ для вариантов моделей РК, указанных в таблице. Рис. 2 – Проекция на меридиональную плоскость векторов скоростей потока в канале РК для варианта №1 Рис. 3 – Проекция на меридиональную плоскость векторов скоростей потока в канале РК для варианта №5 В качестве первого, базового варианта, в котором исключены воздействия неподвижного покрывного диска и зазора, было рассчитано закрытое РК. Полученная характеристика φ_2/φ_2 (2 вар) $0,050 = f(\varphi r_2)$ (рис. 1) хорошо совпадает с характеристикой, рассчитанной по формуле Стодолы [6]. Для выделения влияния фактора трения в расчете варианта №2 покрывной диск неподвижен, а зазор установлен равным 0 мм. Зависимость φ_2/φ_2 (2 вар) $0,050 = f(\varphi r_2)$ в этом варианте пролегла ниже и параллельно зависимости базового варианта. Относительная потеря напора, возникающая вследствие трения газа о неподвижный покрывной диск в окружном движении можно выразить следующей формулой: где φ_2 (1 вар) - коэффициент напора для базового варианта (с подвижным покрывным диском); φ_2 (2вар) - коэффициент напора для варианта с неподвижным покрывным диском. β_H в данном случае составила 1,2 %-1,5 % в диапазоне φr_2 от 0,225 до 0,325. В вариантах №4 и №5 с большими зазорами, соответственно равными 1,6 мм и 4 мм, зависимости φ_2/φ_2 (2 вар) $0,050 = f(\varphi r_2)$ линейны и по мере возрастания зазора пролегают значительно

ниже и круче по сравнению с базовым вариантом. Это означает, что возрастание βH происходит в двух направлениях: по величине зазора δ и расходу φr_2 . В варианте с зазором 1,6 мм при изменении φr_2 в диапазоне от 0,225 до 0,285 величина βH возрастает линейно от 0,056 до 0,1326, а с зазором 4 мм в том же диапазоне изменения φr_2 величина βH возрастает линейно от 0,0945 до 0,238. При условии прямопропорциональности изменения βH по обоим переменным, по результатам расчета вариантов №4 и №5, формула для расчета потери напора βH_i при заданных δ_i и φr_{2i} будет иметь вид: $\beta H_i = \delta_i(0,429\varphi r_{2i} - 0,06306)$. Однако, при уменьшении зазора до 0,8 мм (вариант №3) картина влияния меняется. Зависимость $\varphi r_2/\varphi r_2(2\text{вар})0,050 = f(\varphi r_2)$ также сохраняет линейность и пролегает ниже исходной, но угол наклона линии уменьшается и изменение βH меняется с прямопропорционального на обратнопропорциональное от коэффициента расхода φr_2 . При увеличении φr_2 от 0,228 до 0,29 βH уменьшилось от 0,056 до 0,046. По-видимому, это связано с изменением течения в зазоре, обусловленным влиянием числа Рейнольдса. Однако в рамках этой работы точно установить это не удалось. В результате проведенного анализа численного эксперимента для $\delta = 0-4$ мм установлено: а) наличие зазора оказывает влияние на эффективность РК только в виде потерь напора - б) потери напора были исследованы как функция двух переменных - $\beta H = f(\delta, \varphi r_2)$; в) при фиксированном значении коэффициента расхода $\varphi r_2 = \text{const}$ относительная потеря напора βH в исследованном диапазоне изменяется прямопропорционально величине зазора δ ; г) при фиксированном значении величины зазора $\delta = \text{const}$, потери напора в исследованном диапазоне изменяются прямопропорционально коэффициенту расхода φr_2 . Таким образом, в результате проведенных работ выявлена зависимость потери напора βH от величины зазора δ и коэффициента расхода φr_2 , которая в дальнейшем будет применена при расчете характеристик подобных ступеней.