

УДК 621.165

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;
А.П. УСАТЫЙ, д-р техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ»;
Е.П. АВДЕЕВА, аспірантка НТУ «ХПИ»

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УРАВНИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ ЗА РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНЬЮ НА РАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Проведены исследования влияния режима работы турбины на потери давления в камере за регулирующей ступенью. Приведенные результаты исследования, выполнены с помощью *CFD*-моделирования и других программных комплексов.

Ключевые слова: уравнительная камера, регулирующая ступень, потери давления, режим работы.

Введение

Режимы эксплуатации современных турбин с сопловым парораспределением оказывают существенное влияние на эффективность работы, как регулирующей ступени, так и турбин в целом. Регулирующая ступень изначально имеет некоторую степень парциальности, а эксплуатация турбины на нерасчетных режимах ведет к ее увеличению и как следствие к увеличению дополнительных потерь энергии, снижению КПД регулирующей ступени и эффективности остальных ступеней цилиндра [1]. Величина дополнительных потерь зависит как от конструктивных, так и от режимных параметров. Из конструктивных параметров наиболее важными являются: степень парциальности, межвенцовый зазор [2] и осевое расстояние между регулирующей ступенью и первой ступенью давления. Расстояние между ступенями определяется шириной уравнительной камеры, предназначенной для снижения неравномерности распределения давления рабочего тела на входе в направляющий аппарат первой ступени давления.

Исследование указанной проблемы требует комплексного подхода: проведение расчетного и физического эксперимента. Высокая стоимость физического эксперимента в настоящее время привела к широкому использованию современных методов вычислительной гидродинамики (*CFD*), основанных на моделировании реальных физических процессов течения. Применение трехмерных расчетных моделей позволяет с достаточной точностью оценивать влияние режима работы турбины на общий уровень потерь в камере за регулирующей ступенью.

Данная статья посвящена расчетно-теоретическому исследованию трехмерного течения пара в уравнительной камере за регулирующей ступенью и определению уровня потерь в ней с учетом режимов работы турбины.

Постановка задачи

В качестве прототипа объекта исследования была выбрана уравнительная камера за регулирующей ступенью турбины К-310-240 производства ОАО «Турбоатом», представленная на рис. 1.

Основные геометрические характеристики регулирующей ступени приведены в таблице 1. Направляющий аппарат регулирующей ступени выполнен из трех сегментов с различным количеством сопел.

© А.В. Бойко, А.П. Усатый, Е.П. Авдеева, 2014

Подвод пара к сегментам осуществляется через систему клапанов с последовательным открытием. В первую очередь пар подается в сегмент с наибольшим количеством сопел $Z_c = 40$. Затем ко второму и третьему сегменту с $Z_c = 23$ и $Z_c = 15$, соответственно.

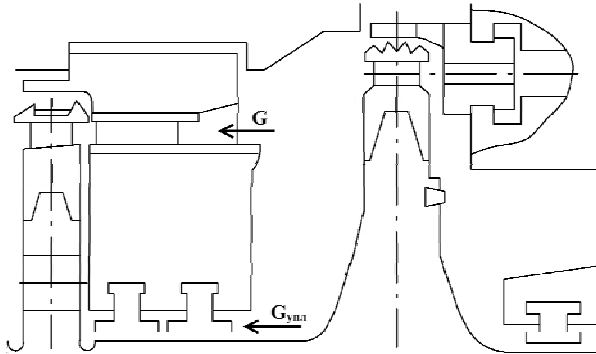


Рис. 1 – Эскиз уравнильной камеры за регулирующей ступенью турбины К-310-240

Параметры режимов работы турбины выбраны из теплового расчета, выполненного ОАО «Турбоатом» и представлены в таблице 2: полное давление (P_c^*) и полная температура (T_c^*) на входе в каждый сегмент; массовый расход на выходе из уравнильной камеры (G); массовый расход в диафрагменное уплотнение ($G_{упл.}$). Частота вращения ротора – 3000 об/мин.

Таблица 1

Геометрические характеристики регулирующей ступени

Параметр	Направляющий аппарат (НА)	Рабочее колесо (РК)
D/l	51,09	45,23
$D_{ср}$, м	1,175	1,176
t/b (на среднем диаметре)	0,684	0,481
l/b (на среднем диаметре)	0,416	0,325
$\alpha_{1эф}$, $\beta_{2эф}$, градус	13	21,83
Количество лопаток, шт.	78	96
Начальная степень парциальности	0,8	–

Исследуемые режимы можно разделить на три группы по количеству открытых сегментов. В каждой группе варьировалось количество подводимого пара на входе в регулируемую ступень, для того, чтобы оценить уровень влияния степени парциальности на эффективность работы уравнильной камеры.

Таблица 2

Исходные данные по режимам работы турбины

Режим	G , кг/с	$G_{упл.}$, кг/с	Сегмент № 1 $Z_c = 40$		Сегмент № 2 $Z_c = 23$		Сегмент № 3 $Z_c = 15$	
			P_c^* , МПа	T_c^* , К	P_c^* , МПа	T_c^* , К	P_c^* , МПа	T_c^* , К
$G_{НОМ}$	274,03	3,05	22,492	808,6	22,031	806,8	22,004	806,7
0,941 $G_{НОМ}$	258,52	2,87	22,376	808,2	21,521	804,8	17,868	789,9
0,919 $G_{НОМ}$	252,47	2,81	22,314	807,9	21,111	803,2	–	–
0,855 $G_{НОМ}$	234,89	2,61	22,165	807,4	17,904	790,0	–	–
0,712 $G_{НОМ}$	195,61	2,17	21,418	804,4	13,449	770,1	–	–
0,670 $G_{НОМ}$	184,07	2,04	20,592	801,1	–	–	–	–
0,480 $G_{НОМ}$	131,87	1,46	14,753	776,1	–	–	–	–

Результаты расчета

Известно, что получение достоверных результатов трехмерного расчета напрямую зависит от построения качественной сетки. Получение такой сетки является весьма сложной задачей, так как исследуемый объект, в силу своих конструктивных особенностей, имеет сложную геометрию. В связи с этим расчетная область была разделена на четыре части: сопловая решетка, межвенцовый зазор, рабочая решетка и камера за регулирующей ступенью (рис. 2).

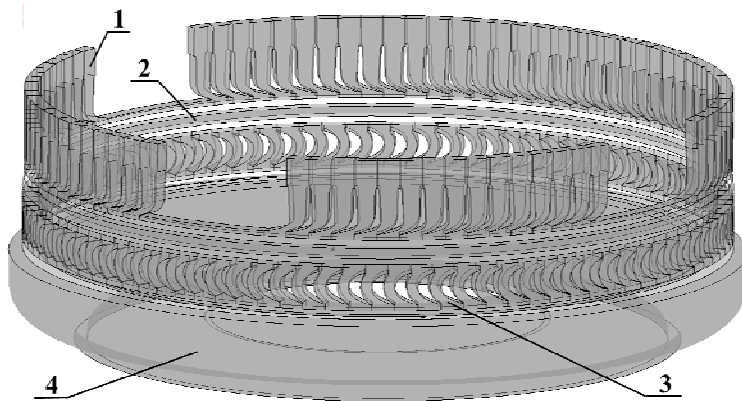


Рис. 2 – Расчетный объем:

1 – сопловая решетка; 2 – межвенцовый зазор;
3 – рабочая решетка; 4 – уравнительная камера

Построение сетки расчетной области сопловой и рабочей решеток осуществлялось с помощью, разработанной на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» программы *TOpGrid* [3], обеспечивающей эффективное построение блочно-структурированных сеток различного уровня сложности. Остальные сетки были выполнены с помощью программы *ICEM CFD*.

Каждый участок расчетного объема

соответствует рис. 1, за исключением сопловой решетки регулирующей ступени, выполненной с удлинением на входном участке для обеспечения равномерного распределения полного давления.

Численные исследования выполнены в программном комплексе *ANSYS CFX*, который базируется на численном решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right],$$

где x_i , $i=1,2$ – декартовы координаты; t – время; u_i – декартовы составляющие вектора средней скорости; p – давление; $\nu_{eff} = \nu + \nu_t$ – эффективный коэффициент кинематической вязкости; ν и ν_t – молекулярный и турбулентный коэффициенты кинематической вязкости.

Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса применяют различные модели турбулентности. Для поставленной задачи использовалась модель турбулентности Ментера (*SST*) с двумя дифференциальными уравнениями.

Выходной участок уравнительной камеры (вход в НА первой ступени давления) в окружном направлении был разделен на 360 равных секторов, в которых определялись значения полного давления осредненного по расходу и по высоте сопла (P^*). Результатами численных расчетов являются зависимости распределения

отношения полного давления в каждом секторе (P^*) к его максимальному значению (P^*_{\max}) (рис. 3).

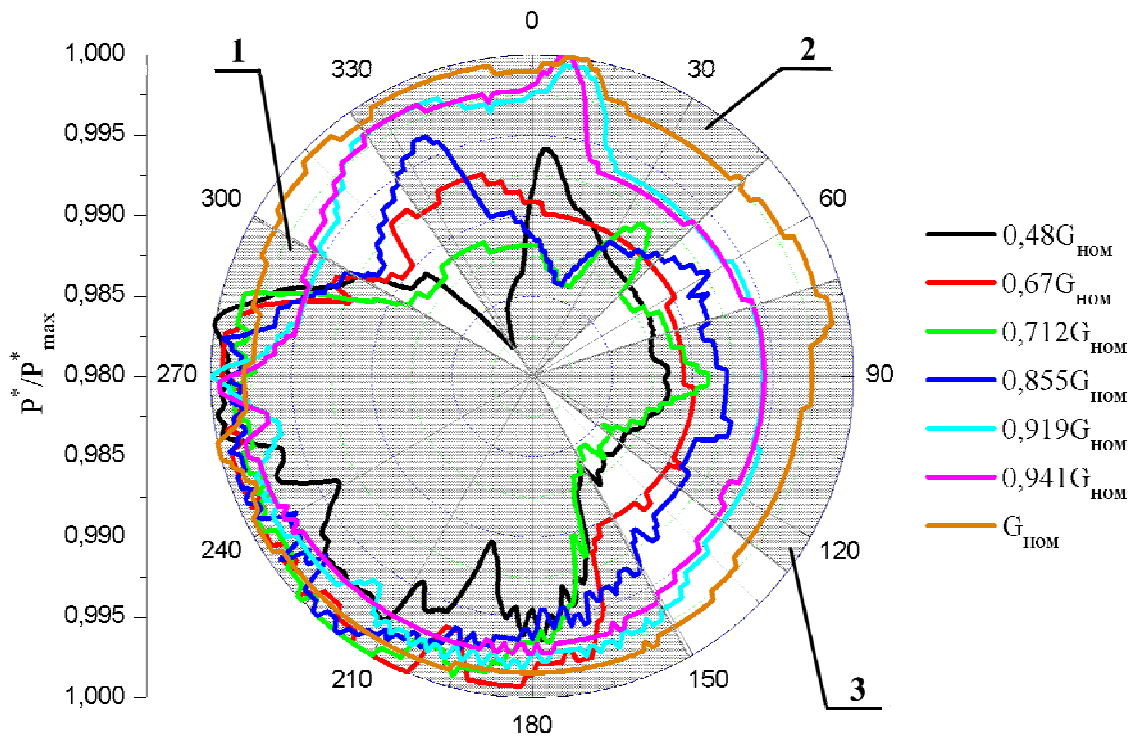


Рис. 3 – Распределение относительного полного давления по окружности на входе в НА первой ступени давления: 1 – сегмент № 1; 2 – сегмент № 2; 3 – сегмент № 3

Из рисунка видно, что на номинальном режиме наблюдается наименьшая степень неравномерности распределения полного давления, чего и следовало ожидать. Несмотря на это имеется небольшой разброс в значениях, который составляет примерно 0,3 %. Для режима с наименьшим расходом рабочего тела ($0,48 G_{\text{НОМ}}$) – этот разброс составляет около 2 %.

Серым цветом выделена область подвода пара к сегментам. Цифрой 1 обозначен наибольший сегмент с количеством сопел $Z_c = 40$, цифрами 2 и 3 обозначены сегменты с числом сопел $Z_c = 23$ и $Z_c = 15$, соответственно.

На рисунке 3 четко выражена область работы сегмента № 1 на всех режимах. Резкие спады и подъемы давления на графике объясняются сложным вихреобразным течением, особенно это ярко выражено на режиме $0,48 G_{\text{НОМ}}$ (рис. 4). В зоне неактивных дуг наблюдается существенное падение относительного полного давления.

Потери давления в уравнильной камере определялись по следующей зависимости

$$\Delta P = \frac{P^*_{\text{ВХ}} - P^*_{\text{ВЫХ}}}{P^*_{\text{ВХ}}} \cdot 100\%,$$

где $P^*_{\text{ВХ}}$ – полное давление на входе в уравнильную камеру (на выходе из рабочего колеса регулирующей ступени), осредненное по расходу, МПа; $P^*_{\text{ВЫХ}}$ – полное давление на выходе из уравнильной камеры (на входе в направляющий аппарат первой ступени давления), осредненное по расходу, МПа.

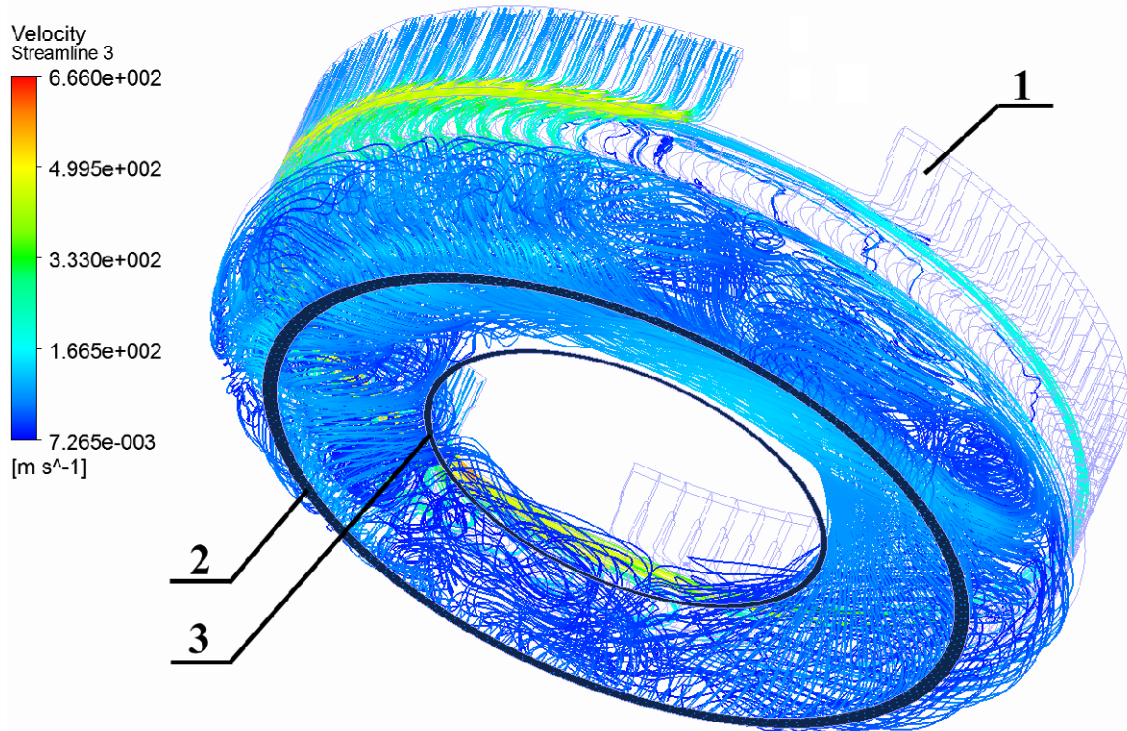


Рис. 4 – Линии тока и величины скорости на режиме $0,48 G_{ном}$:
 1 – сегмент с закрытым регулирующим клапаном; 2 – вход в НА первой ступени давления;
 3 – вход в диафрагменное уплотнение

Трехмерное численное исследование уравнительной камеры показало, что уменьшение в два раза пропускаемого массового расхода пара через турбину приводит к увеличению в четыре раза потерь давления в уравнительной камере (рис. 5).

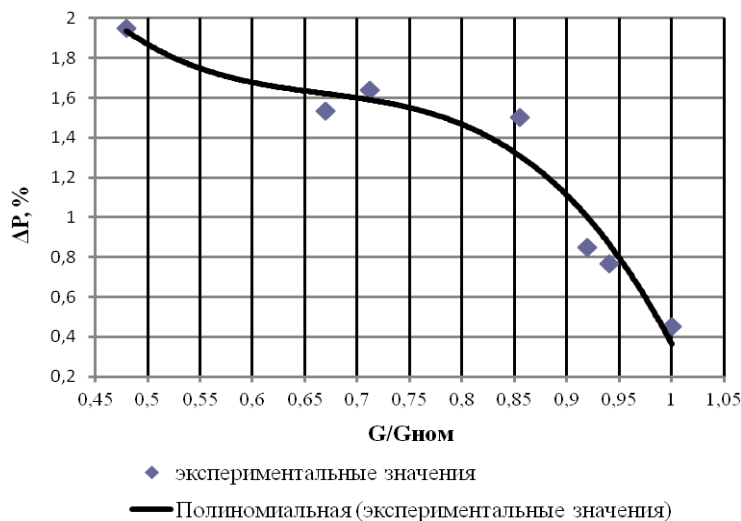


Рис. 5 – Зависимость потерь давления от режима эксплуатации

Уровень потерь давления в уравнительной камере напрямую зависит от нескольких факторов. Одним из основных факторов является степень парциальности регулирующей ступени, при наличии которой возникают дополнительные потери в области неактивных дуг направляющего аппарата регулирующей ступени. С уменьшением расхода пара на входе в проточную часть растет степень парциальности, что приводит к образованию

дополнительных вихрей с более высокой интенсивностью.

Кроме того, важным фактором является и геометрия (конструкция) самой уравнительной камеры. Наличие различного рода уступов и угловых зон в ней ухудшают картину течения, образованием в них вихрей. Из рис. 3, 4 видно, что одной из главных причин возникновения дополнительных потерь в уравнительной камере является наличие интенсивных вихрей в зоне неактивных дуг направляющего аппарата

регулюючої ступені. Якість сітки також впливає на результати розрахунку. В даній роботі розрахункова сітка побудована з 10 млн. 672 тис. ячеек.

На рисунку 4 точками представлені втрати тиску в урівнювальній камері на різних режимах роботи турбіни. Крива третього порядку достатньо точно описує зміну втрат тиску в урівнювальній камері на змінних режимах роботи установки.

Уравнение даної кривої має наступний вигляд

$$y = -28,052x^3 + 56,179x^2 - 38,187x + 10,424.$$

Дана залежність дає можливість враховувати втрати тиску в урівнювальній камері при проектуванні та модернізації турбіни з урахуванням режимів експлуатації.

Висновки

1) Проведені дослідження показали ефективність застосування тривимірної моделювання при дослідженні величини втрат тиску в урівнювальній камері за регулюючою ступенню в залежності від положення регулюючих клапанів.

2) В результаті досліджень була отримана залежність втрат тиску від витрати в урівнювальній камері, а також оцінена ступінь нерівномірності відносного повного тиску в оточуючому напрямку, що дозволяє більш точно проводити оптимізацію елементів проточної частини турбін з урахуванням їх режиму експлуатації.

Список літератури: 1. *Фичоряк, О.М.* Дослідження та розробка способів підвищення ефективності роботи потужних теплофікаційних турбін: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Фичоряк Ольга Михайлівна. – М., 2007. – 180 с. – Бібліогр.: с. 168-180. – 003062734. 2. *Бойко, А.В.* Оцінка впливу міжвенцового зазору на ефективність регулюючої ступені на змінному режимі [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатий, Е.П. Авдеева // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 7. – С. 49-53. – ISSN 2078-774X. 3. *Бойко, А.В.* Побудова параметризованих сіток для тривимірної оптимізації турбінних лопаток [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2008. – № 6. – С. 6-12. 4. *Голушко, А.Н.* Совершенствование камери за регулюючою ступенню паротурбінної установки на основі чисельного моделювання: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Голушко Андрей Николаевич. – Б., 2011. – 125 с. – Бібліогр.: с. 115-123. – 04201251697.

Поступила в редколлегию 05.09.13

УДК 621.165

Чисельне дослідження ефективності урівнювальної камери за регулюючою ступенню на різних режимах роботи [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатий, Е.П. Авдеева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1(1044). – С. 6-11. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X.

Проведені дослідження впливу режиму роботи турбіни на втрати тиску в камері за регулюючим ступенем. Викладено результати дослідження, виконані за допомогою *CFD*-моделювання та інших програмних комплексів.

Ключові слова: вирівнююча камера, регулюючий ступінь, втрати тиску, режим роботи.

The influence of operation mode of steam turbine on the loss of pressure in chamber for the control stage has been investigated. The results of studies performed using *CFD*-simulation and other software systems.

Keywords: equalizing chamber, the control stage, pressure loss, the operating mode.