

УДК 621.165.5

И.А. Кудрявцев, А.С. Ласкин

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА В ПОДВОДЯЩЕМ ТРАКТЕ ЦИЛИНДРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ АЭС

I.A. Kudryavtsev, A.S. Laskin

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FLOW IN INLET MANIFOLD HPC OF THE STEAM TURBINE FOR NPP

В статье представлены результаты исследования структуры потока в подводящих трактах цилиндра высокого давления турбин АЭС. Сопоставлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПАРОВАЯ ТУРБИНА. АЭС. ПОДВОДЯЩИЙ ТРАКТ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА.

This article is discussed structure of the flow in inlet manifold high pressure cylinder of the steam turbine for NPP. Results of compare are presented for experimental research and numerical modeling.

EXPERIMENTAL RESEARCH. NUMERICAL MODELING. STEAM TURBINE. NPP. INLET MANIFOLD. RESEARCH OF THE FLOW.

Статья посвящена совершенствованию трактов подвода пара, которое базируется на исследовании структур потока в подводящих трактах цилиндров высокого давления (ЦВД) быстроходных и тихоходных турбин атомных электростанций (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР).

Основная задача при конструировании входного тракта ЦВД — минимизация потерь кинетической энергии, окружной и радиальной неравномерностей потока перед входом в проточную часть турбины. Минимизация потерь кинетической энергии необходима для повышения КПД ЦВД и всей турбоустановки в целом. Минимизация окружной и радиальной неравномерностей потока также позволит увеличить КПД ЦВД и повысить вибрационную надежность лопаточного аппарата. Поиск направлений совершенствования конструкций подводящих трактов — основная задача данной работы. Для выработки такой усовершенствованной конструкции на первом этапе необходимо исследовать структуру потока в подводящем тракте ЦВД.

Основной метод исследования — сочетание экспериментального исследования и численного моделирования в CFD пакетах. В настоящее время численное моделирование оценивается как наиболее быстрый и относительно дешевый способ получения данных о протекающих физических процессах. При этом в связи со сложностью реальных исследуемых процессов все большее значение приобретают выбор соответствующей модели турбулентности и тестирование результатов численного моделирования.

Для численного моделирования процессов, протекающих в подводящем тракте ЦВД турбины АЭС, применен трехмерный аэрогидродинамический пакет FlowSimulation. Рассматриваемый CFD пакет является составной частью системы автоматизированного проектирования SolidWorks и позволяет рассчитывать широкий круг различных течений на основе $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Для оценки адекватности имитации исследуемых процессов течения FlowSimulation необходимо верифицировать. Для этого ре-

зультаты проведенного экспериментального исследования сравниваются с результатами численного моделирования.

Объект исследования

В качестве объекта для проведения экспериментального исследования структуры потока в подводящем тракте послужила конструкция Ленинградского металлического завода для турбины К-1000–60/3000–2 с подводом в нижнюю часть корпуса ЦВД, что дает ряд преимуществ при монтаже и эксплуатации турбины. Конструкция подводящего тракта рабочего тела в ЦВД представляет собой четыре подводящих патрубка, расположенных под углом 30° к вертикальной оси, соединяющихся в цилиндрическую сборную камеру с эллиптическим днищем. Близкая по схеме конструкция применяется в тихоходных турбинах Харьковского турбогенераторного завода, но в их конструкции сборная камера состоит из объема сферической формы и цилиндрического участка. На рис. 1 изображена схема подвода пара к ЦВД турбины АЭС с ВВЭР и конструкция прототипа подводящего тракта.

На входе в ЦВД пар имеет $y \approx 0$ (степень влажности), $P = 5,76$ МПа, $t = 273^\circ\text{C}$.

Экспериментальная установка

Воздушный экспериментальный стенд представляет собой имитацию участка подвода рабочего тела в ЦВД турбины — четыре подвода к общему коллектору (прототип изображен на рис. 1). Источником рабочего тела для эксперимента выбран вентилятор, находящийся в лаборатории

кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей СПбГПУ. На рис. 2 изображены экспериментальный стенд, контрольные сечения и расположение применяемых пневмозондов.

Движения среды: воздух от вентилятора подается по входной трубе 1 в уравнительную камеру 2 и далее по четырем подводящим трубам 3 поступает в сборный коллектор 4. Камера 2 предназначена для выравнивания расходов в подводящих трубах 3.

Модель входного участка выполнена в масштабе 1:10. Основные размеры: внутренний диаметр сборного коллектора 150 мм; $l/D = 6,6$; внутренний диаметр подводящих труб 48 мм; $l/d = 21$. Для потока в подводящей трубе число Маха $M = 0,19$ и число Рейольдса $Re = 6,1 \times 10^5$. Соответствующие числа для натуре составляют: $M = 0,14$, $Re = 5,5 \times 10^7$. Основные размеры натуре: внутренний диаметр сборного коллектора 1240 мм, $l/D \approx 0,6$, внутренний диаметр подводящих труб 470 мм.

Сборный коллектор в точке входа подводящих труб в модели имеет плоское днище, в отличие от прототипа, который имеет эллиптическое днище. Численное моделирование выполнялось также для конструкции сборного коллектора с плоским днищем.

Контрольно-измерительные приборы

Для измерения полных давлений используются трубки Пито, а для статических давлений — отборы давлений на стенках.

На рис. 2 изображены контрольные сечения в сборном коллекторе и нулевое сечение, соответствующее дну сборного коллектора, в месте

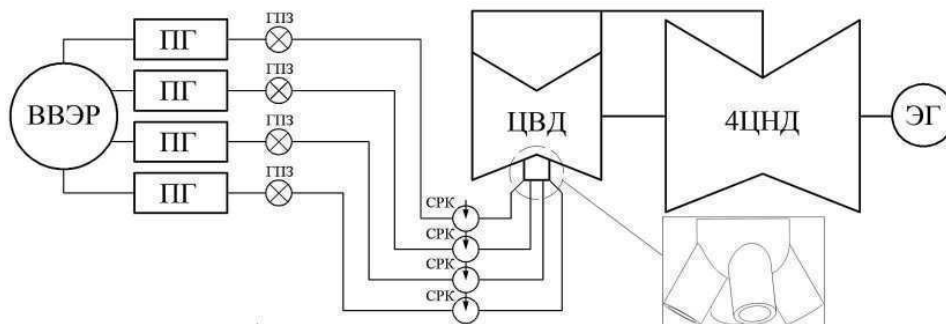


Рис. 1. Схема подвода пара к ЦВД турбины АЭС с ВВЭР (ПГ — парогенератор; ГПЗ — главная паровая задвижка; СРК — стопорно-регулирующий клапан; ЭГ — электрогенератор)

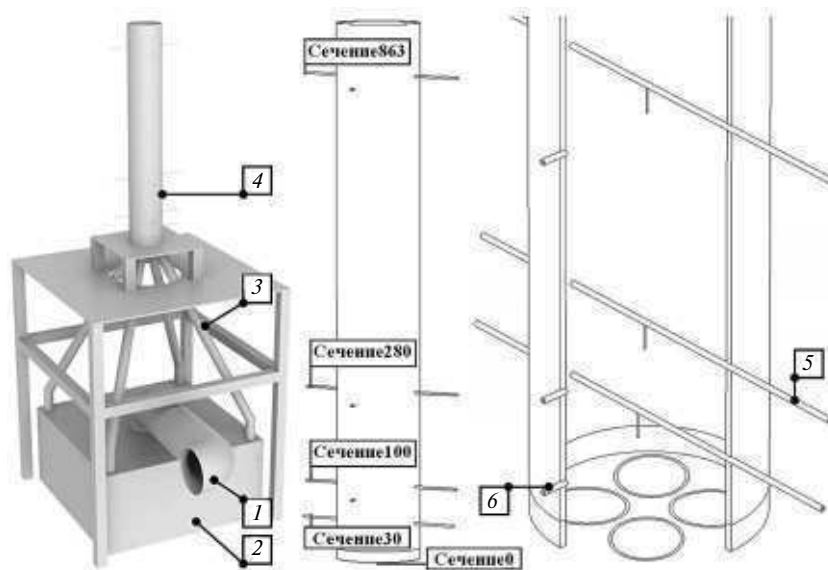


Рис. 2. Экспериментальный стенд, контрольные сечения и пневмозонды:

1 — труба входная; 2 — уравнильная камера; 3 — трубы подводящие; 4 — сборный коллектор; 5 — трубка Пито; 6 — отбор статического давления

входа потоков из подводящих труб. При проведении экспериментального исследования для исключения влияния аэродинамических следов предшествующих зондов в сборном коллекторе одновременно устанавливалась только одна трубка полного давления.

Трубки Пито устанавливались в пяти контрольных сечениях. Одна из них — для контроля входных условий и режима — устанавливалась на подводящей трубе на расстоянии 90 мм по оси трубы от входа в сборный коллектор (сечение —90). В сборном коллекторе измерения проводились в четырех контрольных сечениях по ходу рабочего тела на расстоянии соответственно 30, 100, 280, 863 мм от нулевого сечения (см. рис. 2). Трубки Пито перемещались вдоль диаметра сборного коллектора. Сборный коллектор вместе с установленными в нем зондами имеет возможность вращаться вокруг своей оси, что позволяет исследовать структуру потока в любой точке контрольного сечения.

Отборы статического давления расположены в девяти точках. Один отбор имеется на верхней поверхности уравнильной камеры. Четыре отбора установлено на подводящей трубе, у сечения —90. Отборы статического давления на сборном коллекторе и подводящей трубе выполнены в сечениях, которые соответствуют входу потока в приемную часть зондов полного давления.

Полное давление в сечении —90 измерялось в 19 точках вдоль диаметра, в сечениях 30, 100, 280, 863 — в 33 точках вдоль диаметра. Измерение полных давлений осуществлялось при 12 углах поворота сборного коллектора с шагом в 15°.

Данные из расчета FlowSimulation сопоставлялись с аналогичными данными для тех же контрольных сечений.

Численное моделирование

Для определения достижения сеточной схожести произведен ряд расчетов на сетках различной густоты: $6,5 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^6$ и $3,5 \cdot 10^6$ ячеек. Проведенные расчеты показали, что густота расчетной сетки $3,5 \cdot 10^6$ ячеек — оптимальна, дальнейшее ее сгущение не приведет к существенному уточнению значений целевых параметров. На расчет для $3,5 \cdot 10^6$ ячеек было затрачено порядка 75 часов процессорного времени.

Расчетная модель представляет собой имитацию натурального объекта исследования с соблюдением основных геометрических характеристик.

Анализ полученных результатов

В качестве основных аэродинамических характеристик были приняты коэффициенты местных потерь кинетической энергии ζ_{E_k} и степени неравномерности потока β .

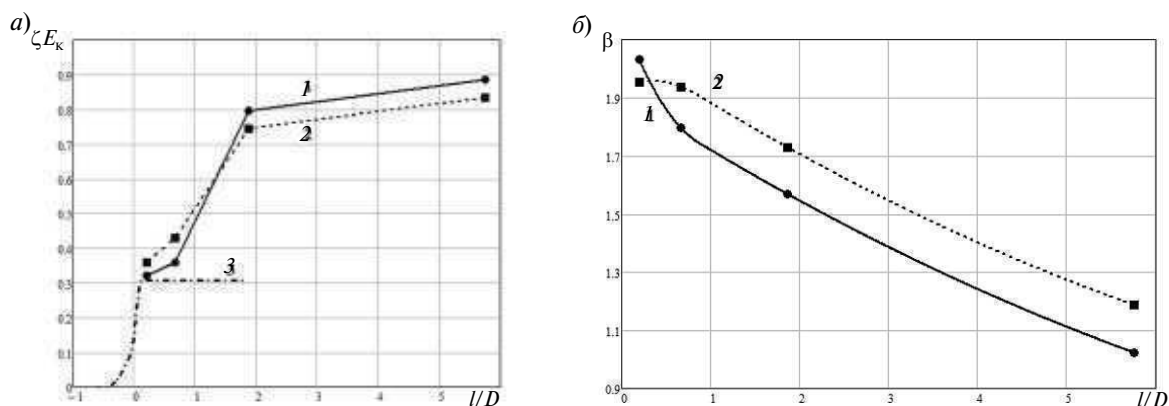


Рис. 3. Зависимости потерь E_{κ} (а) и степени неравномерности β (б) в контрольных сечениях 30, 100, 280, 863: 1 – эксперимент; 2 – FlowSimulation; 3 – по формуле Борда

На рис. 3 представлены зависимости потерь E_{κ} и степени неравномерности в контрольных сечениях.

Изменение коэффициента потерь кинетической энергии $\zeta_{E_{\kappa}} = \frac{\bar{E}_{\kappa 1} - \bar{E}_{\kappa 2}}{\bar{E}_{\kappa 1}}$ по тракту течения

от контрольного сечения $l/D = -0,6$ (–90 мм) до $l/D \approx 5,8$ (863 мм) представлено на рис. 3, а и свидетельствует о существенном возрастании потерь кинетической энергии для модельного тракта до $\zeta_{E_{\kappa}} = 0,8-0,9$. Можно выделить область течения до сечения $l/D \approx 1,3$, где и происходит основная диссипация кинетической энергии. Следовательно, главная причина повышения потерь во входном тракте — местное сопротивление ввода четырех подводящих труб в сборный коллектор. Следует отметить, что для случая ввода потока одной трубой равной площади оценка коэффициента местного сопротивления по формуле Борда

да $\zeta_m = \left(1 - \frac{4S_{пт}}{S_{\kappa}}\right)^2$, где $S_{пт}$ — площадь сечения

подводящей трубы, S_{κ} — площадь сечения сборного коллектора, дает величину $\zeta_m = 0,308$. Это меньше значения, полученного в эксперименте, более чем в 2 раза. Можно сделать предварительный вывод о том, что организация ввода среды в коллектор несколькими трубами (по сравнению с одной центральной трубой равного проходного сечения) всегда будет сопровождаться увеличением местного сопротивления. Это обусловлено тем, что поверхность срывной области при четырех вводах больше, чем для случая с одной подводящей трубой равной площади.

Оценки интегральных потерь по данным эксперимента и численного моделирования отличаются в среднем приблизительно на 10 %, что свидетельствует об их достоверности и практической целесообразности применения пакета FlowSimulation с моделью турбулентности $k-\epsilon$ при проектировании трактов подвода.

Расчетами и экспериментально установлено наличие пространственных вихревых областей. При входе потоков в сборный коллектор в придонном пространстве присутствуют кольцевые вихри.

Четыре вихревые зоны расположены между входящими потоками из подводящих труб и внутренней стенкой сборного коллектора. Вихри занимают область от входа потоков в коллектор до контрольных сечений 30, 100 и далее. Условная поверхность разделения присоединяется к стенке в зоне $l/D \approx 1,8-2$. Пространственная струя от четырех входов внутри коллектора имеет сужение сечения в области $l/D \approx 0,7$, что позволяет отметить существование эффекта Вентури.

Наблюдается также нестационарность изучаемого процесса течения, особенно в области сечений 30 и 100, что подтверждается и результатами численного моделирования.

Изменение неравномерности потока по скорости $\beta = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{c}$ в контрольных сечениях

вдоль тракта течения представлено на рис. 3, б и свидетельствует о высоких уровнях и почти линейном изменении степени неравномерности от 2 до 1. Для натурального тракта подвода длина сборного коллектора соответствует $l/D \approx 0,6-$

0,7 и величине $\beta \approx 1,9-1,8$. Такие высокие уровни неравномерности служат источниками дополнительной генерации турбулентности и снижения КПД проточной части ЦВД. Поток высокой неравномерности, переносимый далее в кольцевой объем перед направляющим аппаратом, может быть источником возбуждающих нагрузок, вызывающих вибрацию рабочих лопаток. Для снижения неравномерности потока целесообразно увеличение длины сборного коллектора.

Основные выводы исследования:

Коэффициент потерь кинетической энергии ζ_{E_k} в модели тракта входа потока в ЦВД

турбины АЭС достигает по величине значений 0,8–0,9.

Основной рост потерь кинетической энергии (до 0,6–0,65) характерен для участка сборного коллектора по l/D от 0 до 1,5.

Степень неравномерности β потока в сборном коллекторе изменяется по его длине от 2 до 1. При $l/D \approx 0,6-0,7$, что характерно для натурального входного тракта, $\beta \approx 1,9-1,8$.

Моделирование течения во входном тракте ЦВД турбины АЭС при помощи FlowSimulation с моделью турбулентности $k-\epsilon$ свидетельствует о достаточной практической точности оценок изменения параметров по тракту и его аэродинамических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трояновский, Б.М.** Паровые и газовые турбины атомных электростанций [Текст]: учеб. пособие для вузов / Б.М. Трояновский, Г.А. Филиппов, А.Е. Булкин.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 256 с.
2. **Гурский, Д.А.** Вычисления в Mathcad12 [Текст] / Д.А. Гурский, Е.С. Турбина.— СПб.: Питер, 2006.— 544 с.: ил.
3. Основные элементы SolidWorks [Текст].— SolidWorks Russia., 2010.— 534 с.
4. **Петунин, А.Н.** Методы и техника измерений параметров газового потока [Текст] / А.Н. Петунин.— М.: Машиностроение, 1972.— 332 с.
5. **Повх, И.Л.** Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И.Л. Повх.— Изд. 3-е, доп. и исправл.— Л.: Машиностроение, 1974.— 480 с.
6. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя [Текст] / Пер. с нем.— М.: Наука, 1974.— 712 с.
7. **Алямовский, А.А.** SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев // СПб.: БХВ-Петербург, 2008.— 1040 с.: ил. + DVD— (Мастер).

REFERENCES

1. **Troyanovskiy B.M., Filipov G.A., Bulkin A.E.** Parovye i gazovye turbiny atomnykh elikrostantsiy [Tekst].— Moscow: Energoatomizdat, 1985.— 256 p. (rus.)
2. **Gurskiy D.A., Turbina E.S.** Vychisleniya v Mathcad12 [Tekst].— Saint-Petersburg: Piter, 2006.— 544 p. (rus.)
3. **Osnovnye elementy SolidWorks.**— SolidWorks Russia. 2010. 534 p. (rus.)
4. **Petunin A.N.** Metody i tekhnika izmereniya parametrov gazovogo potoka [Tekst].— Moscow: Mashinostroenie, 1972.— 332 p. (rus.)
5. **Povh I.L.** Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroenii [Tekst].— Leningrad: Mashinostroenie, 1974.— 480 p. (rus.)
6. **Shlikhting G.** Teoriya pogranchnogo sloya [Tekst].— Moscow: Nauka, 1974.— 712 p.
7. **Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B.** SolidWorks 2007/2008. Kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Tekst].— Saint-Petersburg, BKHV-Peterburg, 2008.— 1040 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАСКИН Александр Степанович — доктор технических наук профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: a.s.laskin@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Игорь Александрович — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ig.kudryavtsev@gmail.com

AUTHORS

LASKIN Alexander S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: a.s.laskin@mail.ru

KUDRYAVTSEV Igor A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ig.kudryavtsev@gmail.com