

На правах рукописи



Кудрявцев Игорь Александрович

**АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВХОДНЫХ
УСТРОЙСТВ ЦВД МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ АЭС
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность:

05.04.12 – «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ласкин Александр Степанович

Официальные оппоненты: Судаков Александр Вениаминович
доктор технических наук, профессор,
ОАО "НПО ЦКТИ", главный научный сотрудник

Беседин Сергей Николаевич
кандидат технических наук,
ООО НТЦ «Микротурбинные технологии»
генеральный директор

Ведущая организация: ПАО "Силовые машины - ЗТЛ, ЛМЗ,
Электросила, Энергомашэкспорт"

Защита состоится 26 сентября 2017 г. в 18:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» <http://www.spbstu.ru/>.

Автореферат разослан «__» 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.06, к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышение экономичности паротурбинных установок (ПТУ) крупных тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанций, возможно осуществить за счет аэродинамического совершенствования не только проточной части турбины, но также и входных устройств ее цилиндров. Входные устройства применяются для подвода пара к цилиндрам турбины и являются их необходимой частью. Если принять потери давления в паровпуске по рекомендациям^(*) $\Delta P_0 = 0,04 \cdot P_0$, где P_0 - давление свежего пара, то по приближенной оценке за счет совершенствования входного устройства ЦВД для турбины типа К-1000-60/3000 можно ожидать повышения внутреннего относительного КПД ЦВД на величину до $\approx 0,4\%$.

Развитие вычислительной гидродинамики позволяет частично заменить экспериментальные исследования по аэродинамическому совершенствованию турбомашин численным моделированием. В настоящее время численное моделирование оценивается, как наиболее выгодный способ получения данных о протекающих физических процессах. При этом, в связи со сложностью реальных исследуемых процессов, все большее значение приобретает выбор соответствующей модели турбулентности и тестирование результатов численного моделирования. Оптимальным методом исследования является сочетание экспериментального исследования и численного моделирования в CFD пакетах.

Настоящая работа посвящена решению актуальной задачи повышения КПД мощных паровых турбин АЭС путем аэродинамического совершенствования входных устройств ЦВД на основе численного моделирования.

Цель работы – на основе численного моделирования определить аэродинамические характеристики применяемых конструкций входных устройств с целью их сравнения и обоснования выбора варианта входного устройства с наименьшими потерями кинетической энергии (КЭ) и минимальной степенью неравномерности потока перед направляющим аппаратом (НА), что при прочих равных условиях равноценно повышению вибрационной надежности рабочих лопаток (РЛ) и повышению КПД турбины.

^(*)Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. Паровые и газовые турбины атомных электростанций: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

- Выполнить сравнительный обзор конструкций входных устройств для ознакомления с применяемыми способами подвода рабочего тела к турбине;
- Обосновать применимость CFD пакета FlowSimulation путем сравнения данных о процессах течения в модельном элементе натурального входного устройства, полученных на основе проведенного экспериментального исследования и численного моделирования;
- На основе численного моделирования и изучения структур потока исследовать различные конструкции входных устройств турбоустановки для определения их аэродинамических характеристик и сравнения их эффективности;
- Определить наиболее технологичный вариант входного устройства с наименьшими потерями кинетической энергии и минимальной неравномерностью потока перед НА.

Научная новизна заключается в следующем:

- Выполнено тестирование имитационных способностей применяемого CFD пакета на основе данных проведенного экспериментального исследования;
- Представлены данные о структуре потока, характерной для двух вариантов входных устройств с подводом к нижней части ЦВД и двух вариантов входных устройств с подводом к нижней и верхней части ЦВД;
- Приведены количественные оценки аэродинамических характеристик четырех конструкций входных устройств ЦВД турбоустановки;
- Предложена конструкция входного устройства с улучшенными аэродинамическими характеристиками.

Практическая значимость работы. Примененные методы исследования и полученные данные о структуре потока и аэродинамических характеристиках входных устройств могут быть использованы с целью совершенствования при проектировании трактов подвода и входных устройств паровых турбин.

Методы исследования. Трехмерное твердотельное моделирование входных устройств осуществлялось в системе SolidWorks. Численное моделирование процессов течения выполнено в трехмерном CFD пакете FlowSimulation, являющимся дополнительным модулем SolidWorks.

На защиту выносятся:

- Результаты экспериментального исследования модели сборного коллектора входного устройства;
- Доказательства возможности применения методов вычислительной газовой динамики (FlowSimulation) для изучения структуры потока во входном устройстве ЦВД мощных паровых турбин АЭС;
- Результаты исследования структуры потока (распределения давлений, скорости и углов потока перед и за НА) во входных устройствах ЦВД турбоустановок при различных способах подвода рабочего тела;
- Результаты исследования по определению аэродинамических характеристик (потерь КЭ, окружной степени неравномерности) четырех конструкций входных устройств ЦВД турбоустановки;
- Конструкция входного устройства варианта 3 с улучшенными аэродинамическими характеристиками.

Достоверность результатов обеспечивается применением системы трехмерного моделирования SolidWorks, имеющей широкий и положительный опыт использования в конструкторской практике. Сопоставление результатов численного моделирования во FlowSimulation с результатами экспериментальных исследований выявили достаточную для практического применения точность оценок полей физических параметров потока и его аэродинамических характеристик.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались: Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 2-7 декабря 2013 года, по результатам конференции получен диплом второй степени за высокие достижения в научно-исследовательской работе; Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2015», 8-11 июня 2015 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы, из них 2 научных статьи в журналах из перечня ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 126 страницах текста, включая 108 рисунков и 5 таблиц, список литературы из 89 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показаны перспективы развития отечественной атомной отрасли на примере нескольких крупных проектов, реализуемых в настоящее время госкорпорацией «Росатом»: «АЭС-2006», «ВВЭР-ТОИ», «Прорыв». Отмечены: актуальность дальнейшего повышения экономичности вводимых в эксплуатацию мощных паровых турбин АЭС и способы достижения этой цели на основе аэродинамического совершенствования элементов турбоустановки.

В **главе 1** рассмотрена структура электроэнергетики, проведен обзор конструкций входных устройств, сформулированы цели и задачи исследования.

В настоящее время основная часть электроэнергии производится на ТЭС и АЭС, одним из ключевых элементов которых является паровая турбина (ПТ). Для большинства электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), для вращения электрогенератора также требуется ПТ.

Структура выработки электроэнергии по типам источников энергии в мире, России по состоянию на 2012 г и Германии на 2013 г представлена на рисунке 1.

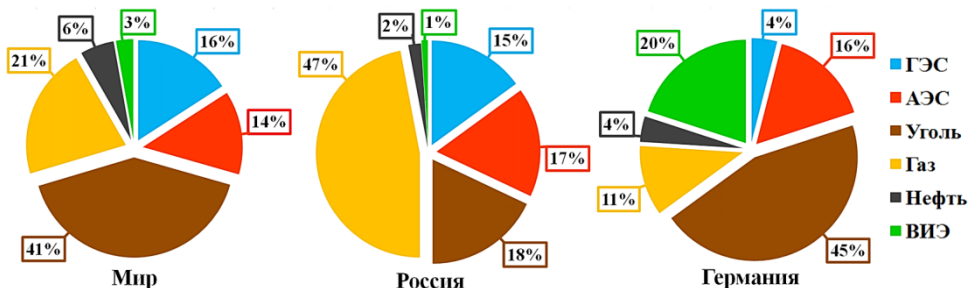


Рисунок 1 – Структура выработки электроэнергии по типам источников энергии

Приведенная структура выработки электроэнергии и отсутствие тенденций к существенному увеличению доли ВИЭ в энергосистемах России и мира позволяет сделать предположение, что подавляющая часть электроэнергии, в ближайшей перспективе, по-прежнему будет вырабатываться на ТЭС и АЭС. Это подчеркивает актуальность повышения КПД вводимых в эксплуатацию крупных паровых турбин.

С целью ознакомления с существующими способами подвода рабочего тела к цилиндрам турбоустановки проведен сравнительный обзор конструкций современных мощных ПТ для АЭС и ТЭС различных фирм производителей.

Отмечена важность аэродинамических исследований входных устройств, проведенных в ОАО "НПО ЦКТИ", а также Гоголевым И.Г.

В современных атомных турбоустановках ПАО «Силловые Машины» применен подвод пара к нижней части ЦВД. Эта конструкция обладает хорошими монтажными и эксплуатационными характеристиками. Однако, такой способ подвода пара может стать источником существенной неравномерности потока, а также значительных углов атаки перед НА первой ступени, что может приводить к увеличению потерь КЭ не только первой, но и последующих ступеней отсека.

Зарубежные заводы изготовители ПТ применяют различные способы подвода пара к цилиндрам. На данный момент нет общепринятой конструкции входного устройства. Пытаясь снизить неравномерность потока перед лопаточным аппаратом (ЛА) и минимизировать потери, применяют тангенциальный подвод пара, экспериментируют с формой камеры, раздающей поток по окружности, используют диагональный НА, применяют кольцевые разделители потока и пр. На рисунке 2 изображены ЦВД атомных турбин Alstom и Siemens.

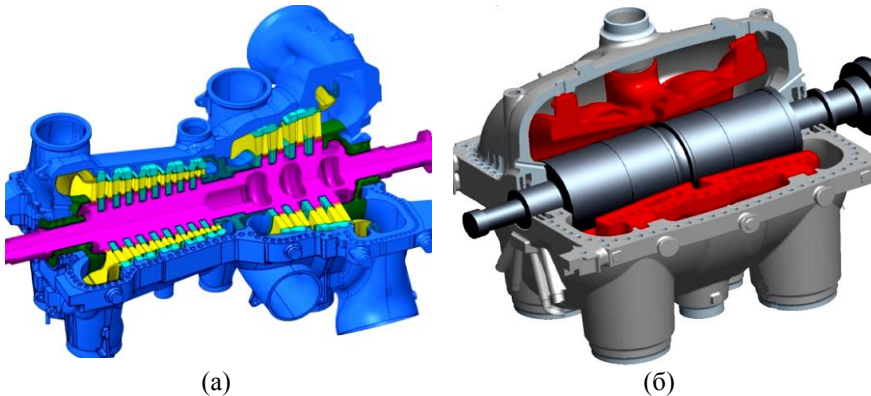


Рисунок 2 – ЦВД Alstom ARABELLE (а), ЦВД Siemens SST-9000 (б)

В турбоустановках Alstom, Siemens и др. применяется подвод пара к верхней и к нижней частям цилиндров. Такой способ подвода вызывает определенные сложности при эксплуатации, однако он более целесообразен с точки зрения минимизации неравномерности потока перед ЛА и снижения потерь.

Актуальность совершенствования мощных ПТ и недостаточная освещенность в литературе конструкций входных устройств стали основаниями для выбора в качестве объекта исследования входного устройства ЦВД ПТУ.

В качестве исходного варианта для исследования структуры потока выбран один из применяемых вариантов конструкции входного устройства ЦВД турбоустановки К-1000-60/3000 для АЭС. Именуется далее как исходный вариант. Можно отметить, что современные турбоустановки для АЭС концерна ПАО «Силловые Машины» во многом унифицированы: подвод пара осуществляется в сборный коллектор в нижней части корпуса ЦВД, параметры пара идентичны, конструкции внутренних корпусов также близки. Исследование исходного варианта входного устройства позволит изучить структуру потока и оценить степень аэродинамического совершенства способа подвода рабочего тела к нижней части цилиндра, характерного для современных, мощных атомных турбин отечественного производства. Исходное входное устройство и его расположение во внешнем корпусе ЦВД представлено на рисунке 3.

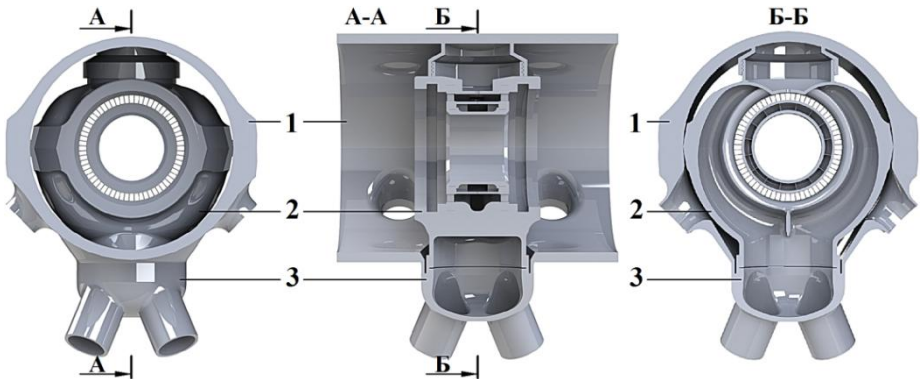


Рисунок 3 – Входное устройство ЦВД исходного варианта:

1 – внешний корпус, 2 – внутренний корпус, 3 – сборный коллектор

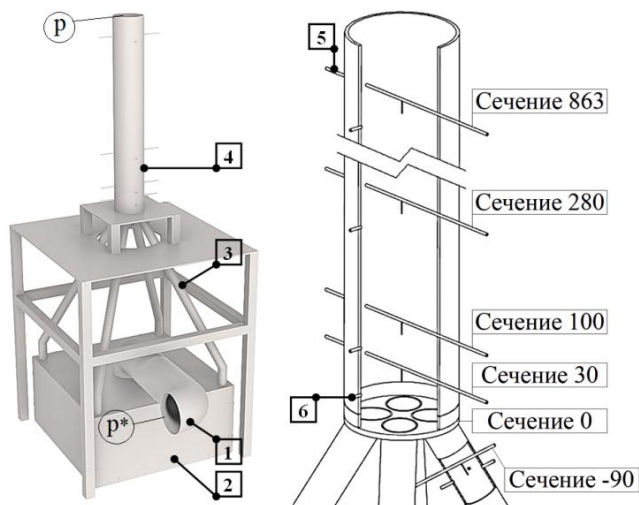
Под входным устройством ЦВД подразумевается совокупность внутреннего корпуса ЦВД и сборного коллектора. Совершенствование входного устройства ЦВД, помимо повышения внутреннего КПД, также позволит повысить вибрационную надежность рабочих лопаток ЦВД.

Глава 2 посвящена результатам экспериментального исследования модели сборного коллектора входного устройства и тестированию применимости CFD пакета FlowSimulation с моделью турбулентности $k-\varepsilon$.

С целью обоснования возможности применения пакета FlowSimulation для расчетов сложных турбулентных течений во входном устройстве необходимо

выполнить тестирование его имитационных способностей на основе изучения геометрически подобного объекта. В качестве такого объекта выбран элемент входного устройства – сборный коллектор.

Для проведения экспериментального исследования создан воздушный стенд, представляющий собой имитацию сборного коллектора ЦВД турбины прототипа. Экспериментальный стенд, контрольные сечения и расположение применяемых пневмозондов изображено на рисунке 4.



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 служит для выравнивания расходов в подводящих трубах 3.

Рисунок 4 – Экспериментальный стенд, контрольные сечения и пневмозонды:

1 – труба входная, 2 – уравнительная камера, 3 – трубы подводящие, 4 – сборный коллектор, 5 – трубка Пито, 6 – отбор статического давления.

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

Контрольные сечения: на подводящей трубе на расстоянии 90 мм ($l/D=-0,6$) по оси трубы от входа в сборный коллектор – сечение -90; в сборном коллекторе по ходу рабочего тела на расстоянии 30 мм ($l/D=0,2$), 100 мм ($l/D=0,67$), 280 мм ($l/D=1,87$), 863 мм ($l/D=5,75$), соответственно, от нулевого сечения.

В экспериментальном исследовании трубки Пито перемещались вдоль диаметра сборного коллектора. Сборный коллектор вместе с установленными в нем зондами вращался вокруг своей оси. В каждом контрольном сечении сборного коллектора количество точек измерения составило ≈ 400 шт.

Расчетная модель представляет собой проточную часть экспериментального стенда (рис. 4). В качестве входного граничного условия задавалось полное давление на входе в трубу 1, выходное граничное условие задавалось на выходе из сборного коллектора 4 и соответствовало атмосферному давлению (рис. 4).

Расчетное исследование проверялось на достижение сеточной сходимости на трех сетках различной густоты: $6,5 \times 10^5$, 2×10^6 , $3,5 \times 10^6$ ячеек. Итоговые результаты получены на сетке из $3,5 \times 10^6$ ячеек. Результаты численного моделирования осреднялись с 3 по 4 секунды расчетного времени, с шагом 0,1 секунды.

Важнейшей особенностью FlowSimulation является обеспечение возможности получения достоверных результатов при относительно небольших вычислительных и временных затратах. Большое количество верификационных примеров^(**) показывает адекватность и эффективность этого пакета для широкого класса задач в различных отраслях промышленности.

В качестве основных аэродинамических характеристик в данной работе приняты: коэффициент потерь КЭ ζ и степень неравномерности потока κ . При обработке экспериментальных данных аэродинамические характеристики определялись по следующим формулам: $\zeta_n = \frac{\overline{E_{k0}} - \overline{E_{kn}}}{E_{k0}}$, где $\overline{E_{kn}}$ – средняя по

площади кинетическая энергия потока в сечении, подстрочный индекс «0» – сечение -90, подстрочный индекс «n» соответствует сечениям в сборном

коллекторе; $\kappa_n = \frac{C_{\max n} - C_{\min n}}{\overline{C_n}}$, где $C_{\max n}$, $C_{\min n}$ – максимальное и минимальное

значение скорости в сечении, $\overline{C_n}$ – средняя скорость в сечении. Значения аэродинамических характеристик в контрольных сечениях, по результатам численных и экспериментальных исследований, приведены на рисунке 5.

^(**) A.V. Ivanov, T.V. Trebunskikh, V.V. Platonovich. Validation methodology for modern CAD-embedded CFD code: from fundamental tests to industrial benchmarks. NAFEMS World Congress, 2013.

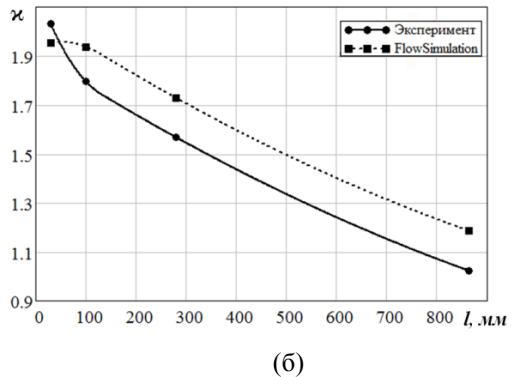
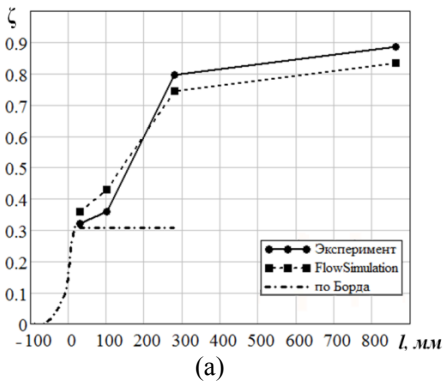


Рисунок 5 – Коэффициент потерь ζ (а) и степени неравномерности κ (б)

Изменение коэффициента потерь КЭ в диапазоне сечений от -90 до 863, свидетельствует о существенном возрастании потерь КЭ до $\zeta = 0,8 - 0,9$. Можно выделить область течения до сечения ≈ 300 , где и происходит основная диссипация КЭ. Следовательно, главная причина потерь в сборном коллекторе – местное сопротивление ввода четырех подводящих труб. Для случая ввода потока одной трубой равной площади, оценка коэффициента местного сопротивления по формуле Борда, составляет $\zeta_m = 0,308$, что меньше экспериментального значения, более чем в 2 раза. Это можно объяснить тем, что поверхность срывной области при четырех вводах больше, чем для случая с одной подводящей трубой равной площади.

Изменение неравномерности потока рис. 5 (б) свидетельствует о высоких уровнях и почти линейном уменьшении степени неравномерности от 2 до 1 в диапазоне сечений от 30 до 863.

Расчетами и экспериментально установлено наличие четырех пространственных вихревых областей, расположенных между входящими потоками из подводящих труб и внутренней стенкой сборного коллектора. Вихри занимают область от входа потоков в коллектор до сечений 30, 100 и далее. Поверхности разделения вихревых областей и основного потока присоединяются к стенке в зоне сечения ≈ 300 . Пространственная струя от четырех входов внутри коллектора имеет сужение сечения в области сечения ≈ 100 , что позволяет отметить существование эффекта Вентури. Наличие этого эффекта демонстрируют изображенные на рисунке 6 распределения полных и статических давлений в модели сборного коллектора, по результатам численных и экспериментальных исследований.

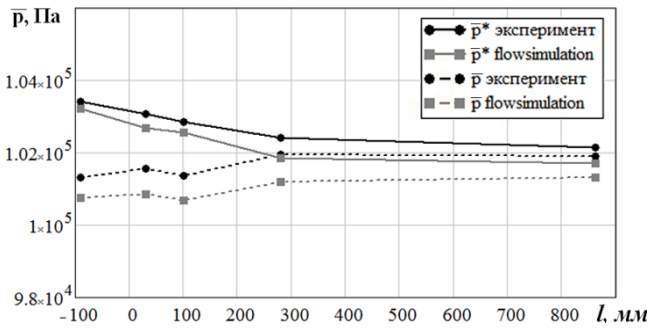


Рисунок 6 – Изменение осредненных полного и статического давлений

Присутствие эффекта Вентури, в области сечения ≈ 100 сопровождается локальным снижением статического давления, что в соответствии с уравнением неразрывности приводит к ускорению потока.

Сходство структур потока и форм полей скоростей, по результатам обработки экспериментальных данных и данных численного моделирования, представленных на рисунке 7, свидетельствует о подобию процессов протекавших в экспериментальной установке и в расчетной среде FlowSimulation.

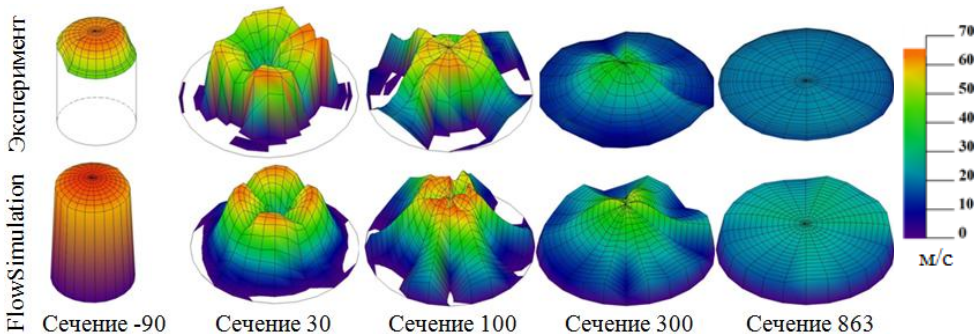


Рисунок 7 – Поля скоростей по экспериментальным данным и FlowSimulation

Оценки потерь КЭ по данным эксперимента и численного моделирования отличаются, в среднем, менее 8%, что свидетельствует о их достоверности и практической целесообразности применения пакета FlowSimulation при проектировании входных устройств.

Для тестирования имитационных возможностей пакета FlowSimulation при моделировании течений в ЛА, выполнено сравнение результатов моделирования процессов течения в плоской решетке с результатами эксперимента^(***).

(***) Speidel L., Sholz N. Untersuchungen über die Strömungsverluste in ebenen Schaufelgittern. VDI-Forschungshefte 464, 1957.

Основное снижение полного давления и рост статического давления (рис. 6) соответствует диапазону сечений от -90 до 300, где наблюдается основная диссипация КЭ.

Геометрические характеристики решетки: профиль *NACA 0010*, хорда $b=200$ мм, длина пера 600 мм, $t/b=0,5$, $c/b\approx 0,1$. Исследование проводилось в равномерном потоке при безударном входе и нормальных условиях, число $M=0,12$, число $Re=5\times 10^5$. Близкая конструкция решетки в дальнейшем использовалась для моделирования НЛ в выходном сечении входного устройства.

Коэффициент потерь КЭ плоской решетки определялся по формуле:

$$\zeta = \frac{\bar{p}_1^* - \bar{p}_2^*}{\rho \frac{c_1^2}{2}}, \text{ где } \bar{p}^* - \text{ полное давления, } \rho - \text{ плотность, } \bar{c} - \text{ скорость. Коэффициенты}$$

потерь КЭ составили: в эксперименте – $\zeta_{\text{эксп}} = 0,038$, при моделировании – $\zeta_{\text{расч}} = 0,043$. Близкие значения расчетного и экспериментального коэффициентов потерь КЭ свидетельствуют об удовлетворительной имитации процессов течения в лопаточном аппарате и достоверности численного моделирования.

Результаты проведенного тестирования свидетельствуют о том, что CFD пакет FlowSimulation с моделью турбулентности $k-\varepsilon$ позволяет с достаточной практической точностью оценивать параметры потока и аэродинамические характеристики для исследованной модели сборного коллектора. Можно также сделать вывод о том, что этот пакет может быть применен для выполнения численного моделирования сложных течений в устройствах подобных конструкций.

В **главе 3** представлены результаты исследований структур потока для двух вариантов входного устройства с подводом рабочего тела к нижней части цилиндра. Определены параметры потока на входе и выходе НА и аэродинамические характеристики изучаемых входных устройств.

Расчетная модель исходного варианта входного устройства с контрольными сечениями представлена на рисунке 8.

В связи с отсутствием данных о профиле

и закрутке лопаток натурального НА первой ступени в расчетной модели применена

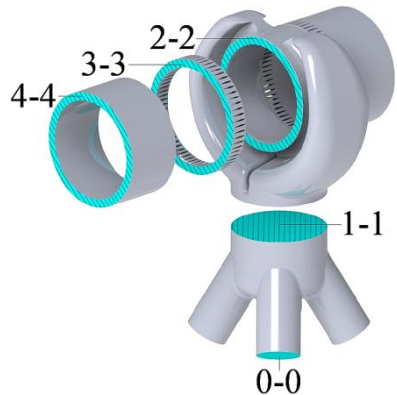


Рисунок 8 – Расчетная модель исходного варианта: 0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 - контрольные сечения

имитационная направляющая решетка (ИНР). Лопатки ИНР выполнены незакрученными из симметричного профиля *Мунк-3* с хордой $b=200$ мм. Высота лопаток и их число соответствуют натурному НА, $l_l=107$ мм, $z_l=64$ шт, $t/b \approx 0.3$, $c/b \approx 0.12$. В расчетной модели увеличена длина выходного участка за ИНР до 800 мм, он представляет собой обечайку с постоянными значениями корневого и среднего радиусов. Конструкция ИНР и выходного участка оставались одинаковыми для всех исследованных конструкций входных устройств. Проточная часть ИНР, контрольные межлопаточные объемы и расположение контрольных сечений 2-2, 3-3 представлены на рисунке 9.

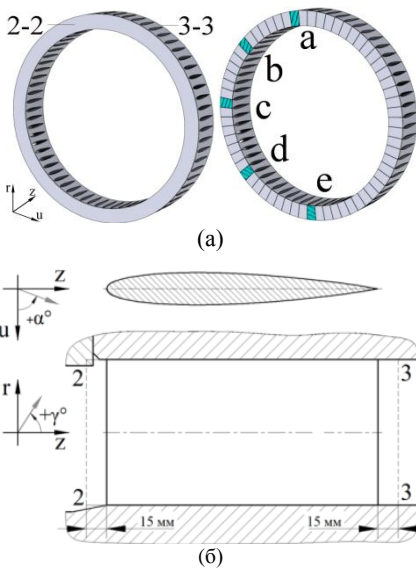


Рисунок 9 – Проточная часть ИНР (а), межлопаточный объем (б)

В качестве углов потока приняты: угол α – между положительным направлением оси u и проекцией вектора скорости на плоскость $z-u$; угол γ – между положительным направлением оси z и проекцией вектора скорости на меридиональную плоскость $r-z$. Значения углов потока осреднялись по расходу.

В проведенных исследованиях в качестве входных граничных условий принималось статическое давление в сечениях 0-0. В качестве выходных граничных условий задавался расход рабочего тела в сечениях 4-4. При численном моделировании рабочее тело – воздух. Допустимость применения воздуха

Контрольные сечения 2-2 и 3-3 расположены в 15 мм от входной и выходной кромок ИНР соответственно (рис. 9б). Положение контрольных сечений 2-2, 3-3, 4-4 оставалось одинаковым для всех конструкций входных устройств.

Сечения 2-2 и 3-3 можно представить в виде совокупности входных и выходных поверхностей межлопаточных объемов ИНР (рис. 9а). Исследование распределений параметров потока (давление, скорость, углы потока) по высоте лопатки ИНР осуществлялось в контрольных межлопаточных объемах (а, б, с, d, е рис. 9а).

оправдана тем, что влажность пара перед первой ступенью ЦВД турбины прототипа составляет $y \approx 0,5\%$.

Для потока в подводящей трубе турбины прототипа: $k \approx 1,3$, число $Re = 4,7 \times 10^7$, число $M = 0,11$. Соответствующие значения при численном моделировании составляли: $k \approx 1,4$, $Re = 3 \times 10^7$, $M = 0,1$.

Проведенные расчеты для всех исследованных вариантов входных устройств проверялись на достижение сеточной сходимости. С этой целью для каждого варианта входного устройства проводилось численное моделирование на четырех расчетных сетках различной густоты. Сопоставление результатов показало, что сходимость достигалась на расчетных сетках в диапазоне $2 \times 10^6 - 2,5 \times 10^6$ ячеек.

В исследованных конструкциях входных устройств определяются интегральные и локальные коэффициенты потерь КЭ, а также степень неравномерности потока. Интегральный коэффициент потерь КЭ –

$$\zeta_{\Sigma} = \frac{\overline{P_i^* - P_{i+1}^*}}{\overline{P_0^* - P_4^*}}, \text{ локальный} - \zeta = \frac{\overline{P_i^* - P_{i+1}^*}}{\overline{P_i^* - P_{i+1}^*}}, \text{ где } \overline{P^*}, \overline{P} - \text{осредненные по расходу}$$

полное и статическое давление соответственно, подстрочные индексы 0, 4, $i=0,1,2,3$ – номера контрольных сечений.

Степень окружной неравномерности потока оценивается в контрольных сечениях 2-2 и 3-3 – $\mu = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{\bar{C}}$, где C_{\max} , C_{\min} – максимальное и минимальное значение осредненной по расходу скорости определяемое для входных и выходных поверхностей всех межлопаточных объемов ИНР, \bar{C} – осредненная по расходу скорость для всего контрольного сечения. Неравномерность потока формируются: в сечении 2-2 из-за воздействия на поток входного устройства и потенциальной неравномерности от лопаток ИНР; в сечении 3-3 от воздействия на поток входного устройства и кромок следов.

В исходном варианте интегральные коэффициенты потерь КЭ составляют: во входном устройстве – $\zeta_{\Sigma 0-2} = 0,26$, в сборном коллекторе – $\zeta_{\Sigma 0-1} = 0,032$, в области улиток – $\zeta_{\Sigma 1-2} = 0,228$, в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2-3} = 0,242$.

Локальные коэффициенты потерь КЭ составляют: в сборном коллекторе – $\zeta_{0-1} = 0,097$, в области улиток – $\zeta_{1-2} = 0,237$, в ИНР – $\zeta_{2-3} = 0,308$.

Значения углов $\bar{\alpha}$, на входе в ИНР, находятся в диапазоне $\bar{\alpha}_{2,2} \approx 90^\circ \div 130^\circ$, достигая максимальных значений в области горизонтального разреза. Диапазон значений углов $\bar{\gamma}$, на входе в ИНР, составляет $\bar{\gamma}_{2,2} \approx 2^\circ \div 9^\circ$.

Степени окружной неравномерности потока составляют: на входе в ИНР – $\kappa_{2,2} = 0,282$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3,3} = 0,32$.

Для снижения уровней потерь КЭ и неравномерности потока, обнаруженных в исходном варианте, предложена конструкция входного устройства варианта 1. Цилиндрический участок сборного коллектора удлинен до 2,5 м, в остальном конструкция входного устройства варианта 1 аналогична исходному варианту. На рисунке 10 изображена расчетная модель варианта 1 с контрольными сечениями.

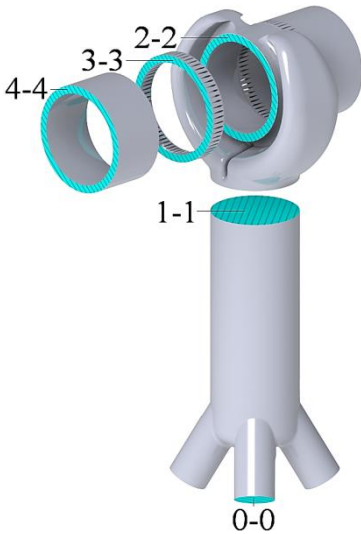


Рисунок 10 – Расчетная модель варианта 1:

0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 -
контрольные сечения

Для варианта 1 интегральные коэффициенты потерь КЭ составляют: во входном устройстве – $\zeta_{\Sigma 0,2} = 0,251$, в сборном коллекторе – $\zeta_{\Sigma 0,1} = 0,035$, в области улиток – $\zeta_{\Sigma 1,2} = 0,216$, в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2,3} = 0,252$.

Локальные коэффициенты потерь КЭ для варианта 1 составляют: в сборном коллекторе – $\zeta_{0,1} = 0,107$, в области улиток – $\zeta_{1,2} = 0,212$, в ИНР – $\zeta_{2,3} = 0,306$.

Значения углов α и γ на входе в ИНР, а также неравномерности потока, сохранились практически на уровне исходного варианта. Степени окружной неравномерности потока составляют: на входе в ИНР – $\kappa_{2,2} = 0,27$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3,3} = 0,302$.

Изменение структуры потока перед улитками в варианте 1 не привело к существенному уменьшению потерь КЭ для потока в улитках. По сравнению с исходным вариантом интегральный коэффициент потерь КЭ $\zeta_{\Sigma 0,2}$ уменьшился на 3%. Интегральный коэффициент потерь КЭ для области улиток $\zeta_{\Sigma 1,2}$ уменьшился на 5%. Степень окружной неравномерности потока перед ИНР $\kappa_{2,2}$ уменьшилась на 4%.

В **главе 4** представлены результаты исследований входных устройств с подводом рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра, определены их аэродинамические характеристики и параметры потока на входе и выходе НА.

Конструкции исходного варианта и варианта 1, с подводом рабочего тела к нижней части цилиндра, обладают сравнительно высокими потерями КЭ $\zeta_{\Sigma 0.2} \approx 0,26$ и неравномерностью потока перед отсеком ЦВД $\kappa_{2.2} \approx 0,28$.

Для решения задачи аэродинамического совершенствования необходим переход к иной конструкции входного устройства, обладающей значительно меньшей степенью неравномерности и меньшим уровнем потерь КЭ. С этой целью разработана конструкция варианта 2, в котором подвод рабочего тела осуществляется четырьмя радиально расположенными трубами и подводящими камерами. На рисунке 11 изображена расчетная модель варианта 2 с контрольными сечениями.

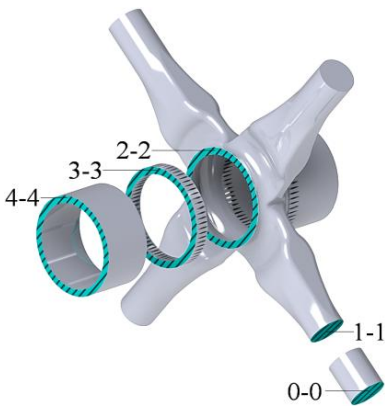


Рисунок 11 – Расчетная модель варианта 2:

0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 -
контрольные сечения

Для варианта 2 интегральные коэффициенты потерь КЭ составляют: в входном устройстве – $\zeta_{\Sigma 0.2} = 0,05$, в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{\Sigma 0.1} = 0,006$, от входа в диффузор до входа в ИНР – $\zeta_{\Sigma 1.2} = 0,044$, в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2.3} = 0,221$.

Локальные коэффициенты потерь КЭ для варианта 2 составляют: в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{0.1} = 0,01$, от входа в диффузор до входа в ИНР – $\zeta_{1.2} = 0,053$, в ИНР – $\zeta_{2.3} = 0,233$.

Применяемый способ подвода рабочего тела приводит к формированию существенно меньших углов атаки и неравномерностей потока перед ИНР в сравнении с исходным вариантом. Значения углов $\bar{\alpha}$ на входе в ИНР, находятся в диапазоне $\bar{\alpha}_{2.2} \approx 83^\circ \div 95^\circ$. Диапазон значений углов $\bar{\gamma}$ на входе в ИНР составляет $\bar{\gamma}_{2.2} \approx 4^\circ \div 1^\circ$. Степени окружной неравномерности потока составляют: на входе в ИНР – $\kappa_{2.2} = 0,167$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3.3} = 0,098$.

По сравнению с исходным вариантом интегральный коэффициент потерь КЭ входного устройства варианта 2 $\zeta_{\Sigma 0-2}$ уменьшился на 80%. Степень окружной неравномерности на входе в ИНР κ_{2-2} уменьшилась на 41%.

Входное устройство варианта 2 обладает улучшенными аэродинамическими характеристиками, но его реализация сопряжена с трудностями, главная из которых – размещение входного устройства внутри цилиндра, обусловлена радиальным расположением подводящих труб.

Для преодоления технологических сложностей при реализации идеи более равномерного подвода, разработано входное устройство варианта 3 с вертикальным расположением осей подводящих труб. На рисунке 12 изображена расчетная модель варианта 3 с контрольными сечениями.

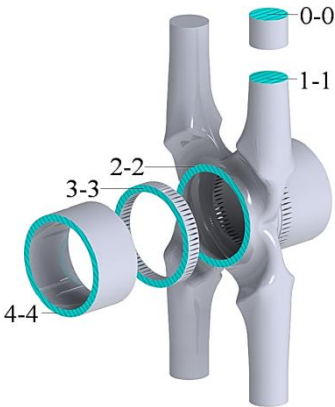


Рисунок 12 – Расчетная модель варианта 3:

0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 -
контрольные сечения

Для варианта 3 интегральные коэффициенты потерь КЭ составляют: во входном устройстве – $\zeta_{\Sigma 0-2}=0,072$, в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{\Sigma 0-1}=0,005$, от входа в диффузор до входа в ИНР – $\zeta_{\Sigma 1-2}=0,067$, в ИНР – $\zeta_{\Sigma 2-3}=0,2$.

Локальные коэффициенты потерь КЭ для варианта 3 составляют: в цилиндрической части пароподводящей камеры – $\zeta_{0-1}=0,008$, от входа в диффузор до входа в ИНР $\zeta_{1-2}=0,078$, в ИНР – $\zeta_{2-3}=0,214$.

Входное устройство варианта 3 приводит к формированию существенно меньших углов атаки и неравномерностей потока перед ИНР по сравнению с исходным вариантом, хотя их величины несколько выше полученных в варианте 2. Значения углов $\bar{\alpha}$ на входе в ИНР, находятся в диапазоне $\bar{\alpha}_{2-2} \approx 80^\circ \div 102^\circ$. Диапазон значений углов $\bar{\gamma}$ на входе в ИНР составляет $\bar{\gamma}_{2-2} \approx -3^\circ \div 3^\circ$. Степени окружной неравномерности потока составляют: на входе в ИНР – $\kappa_{2-2}=0,204$, на выходе из ИНР – $\kappa_{3-3}=0,14$.

Для варианта 3 характерны существенно меньшие потери КЭ по сравнению с исходным вариантом, интегральный коэффициент потерь КЭ входного устройства

варианта 3 $\zeta_{\Sigma 0-2}$ уменьшился на 72%. Степень окружной неравномерности на входе в ИНР \mathcal{H}_{2-2} уменьшилась на 28%.

Глава 5 посвящена дополнительному сопоставлению результатов изучения структур потока и аэродинамических характеристик исследованных конструкций входных устройств. Для их сравнения воспользуемся интегральными характеристиками, представленными на рисунке 13 и в таблице 1.

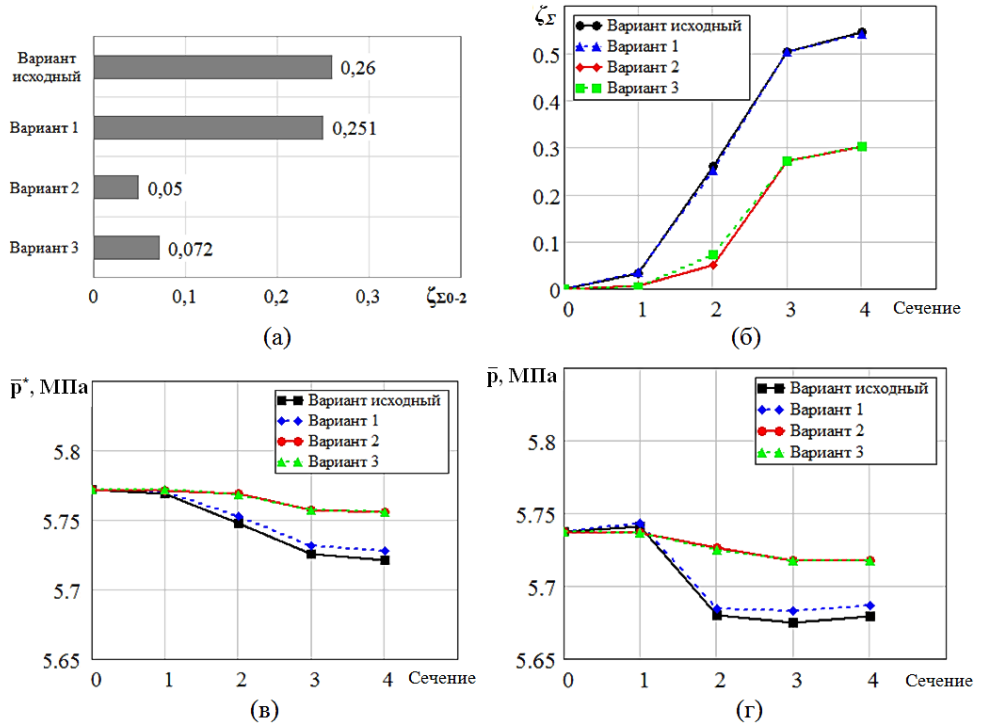


Рисунок 13 – Интегральные коэффициенты потерь КЭ (а), (б), полное давление (в), статическое давление (г)

Таблица 1. Аэродинамические характеристики входных устройств

Хар-ка / Вариант	$\zeta_{\Sigma 0-1}$	$\zeta_{\Sigma 1-2}$	$\zeta_{\Sigma 0-2}$	$\zeta_{\Sigma 0-2} / \zeta_{\Sigma 0-2,исх}$	$\bar{p}_{2-2} / \bar{p}_{0-0}$	\mathcal{H}_{2-2}	$\mathcal{H}_{2-2} / \mathcal{H}_{2-2,исх}$
Исходный	0,032	0,228	0,260	1	0,990	0,282	1
1	0,035	0,216	0,251	0,965	0,991	0,270	0,957
2	0,006	0,044	0,050	0,192	0,998	0,167	0,592
3	0,005	0,067	0,072	0,277	0,998	0,204	0,723

Представленные характеристики свидетельствуют о том, что для исходного входного устройства и варианта 1 уровни интегральных коэффициентов потерь КЭ

для области улиток $\zeta_{\Sigma 1-2}$ составляют почти 90% от потерь во всем входном устройстве $\zeta_{\Sigma 0-2}$ и существенно выше потерь для потока при внезапном расширении в сборном коллекторе $\zeta_{\Sigma 0-1}$.

При способе подвода рабочего тела к нижней части цилиндра (варианты исходный и 1), улитки обладают наибольшим сопротивлением, причем высокий уровень их сопротивления формируется практически независимо от входных условий перед улитками, об этом свидетельствует исследование варианта 1.

Входные устройства исходного варианта и варианта 1 приводят к формированию перед ИНР потока с углами натекания в наибольшей степени отличающимися от осевого направления. В области горизонтального разъема (межлопаточный объем «с» рис. 9а) отмечается наибольшее отклонение от осевого направления, угол атаки достигает почти 40° . На периферии межлопаточного объема «е» (рис. 9а) отмечается наличие вихревой области обуславливающей высокие уровни неравномерности потока перед ИНР. Эта вихревая область распространяется через ИНР и частично сохраняется на значительном удалении от нее, это может привести к снижению вибрационной надежности РЛ.

Неравномерность потока в контрольных сечениях 2-2, 3-3 для исследованных конструкций входных устройств демонстрируют представленные на рисунке 14 распределения скоростей, осредненных по расходу на входных и выходных поверхностях межлопаточных объемов ИНР, в полярной системе координат. Чем ближе распределение к окружности, тем равномернее поток.

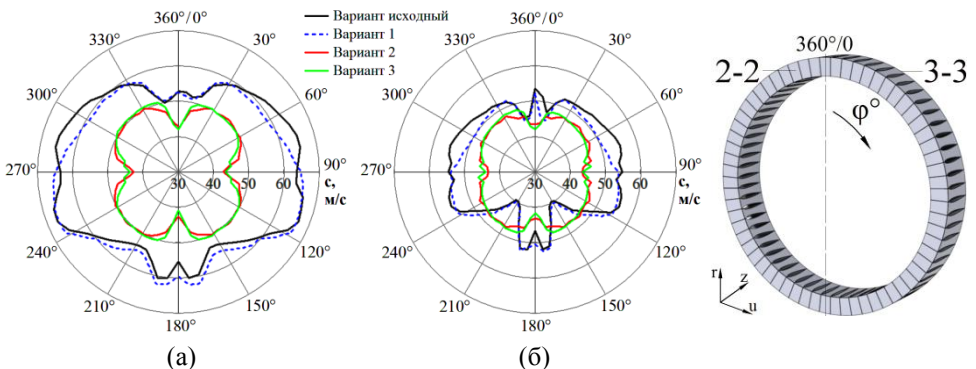


Рисунок 14 – Распределение осредненных по расходу скоростей в контрольных сечениях: сечение 2-2 (а), сечение 3-3 (б)

Входные устройства вариантов 2 и 3 приводят к формированию потока с почти в четыре раза меньшими максимальными углами атаки по сравнению с исходным вариантом. В сформированном внутреннем потоке отсутствуют какие-либо существенные вихревые области и зоны отрывных течений, это обуславливает почти четырехкратное снижение сопротивления и двукратное уменьшение неравномерности потока перед ИНР в вариантах 2 и 3 по сравнению с исходным вариантом и вариантом 1.

В проведенных исследованиях ИНР выступает в роли индикатора потерь КЭ, под влиянием неравномерности потока, формирующейся после прохождения входного устройства. Для оценки влияния неравномерности потока на потери КЭ в ИНР, проведено численное исследование ее обтекания в равномерном потоке при безударном входе. На рисунке 15 представлены локальные коэффициенты потерь КЭ в ИНР ($\zeta_{2,3}$) и степени окружной неравномерности на входе в ИНР ($\chi_{2,2}$).

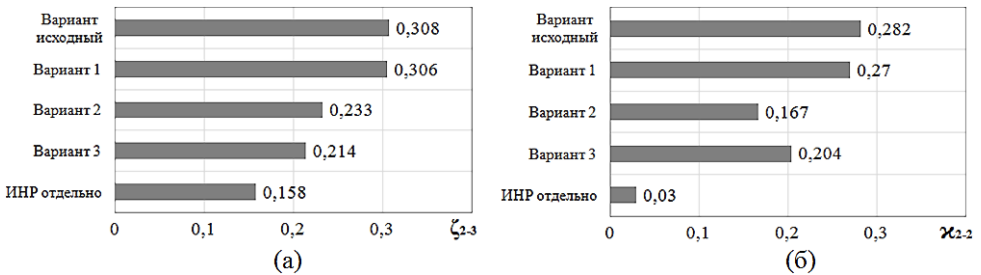


Рисунок 15 – Локальные коэффициенты потерь КЭ в ИНР $\zeta_{2,3}$ (а), степень окружной неравномерности перед ИНР $\chi_{2,2}$ (б)

Локальный коэффициент потерь КЭ в изолированной ИНР составил – $\zeta_{2,3}=0,158$, что на $\approx 49\%$ меньше, чем для вариантов исходного и первого и на 32% и 26% меньше чем для второго и третьего вариантов соответственно. Большие потери в ИНР рассмотренных входных устройств обуславливаются влиянием неравномерной структуры потока и углами атаки перед ИНР, возникающими в потоке после входных устройств. Высокий уровень потерь изолированной ИНР объясняются её густотой и сравнительно толстым профилем лопаток: относительный шаг $t/b \approx 0,3$, относительная толщина профиля $Mynk-3$ $c/b \approx 0,12$.

В исследованных входных устройствах неравномерность потока на входе в ИНР формируется из-за воздействия на поток входного устройства и потенциальной

неравномерности от лопаток ИНР. Окружная неравномерность потока на входе в изолированную ИНР, вызвана только потенциальной неравномерностью от воздействия лопаток ИНР и составляет $\kappa_{2,2}=0,03$, что на $\approx 90\%$ меньше, чем для вариантов исходного и первого, и на $\approx 80\%$ меньше чем для вариантов 2 и 3. Следовательно, основной вклад в формирование окружной неравномерности потока перед ИНР вносит входное устройство.

Уменьшение неравномерности потока перед ИНР в вариантах 2 и 3 приводит к снижению уровня потерь в ИНР приблизительно на 40% по сравнению с исходным вариантом подвода. С некоторым допущением этот вывод может быть использован при оценке влияния неравномерности потока перед НА первой ступени натурального отсека ЦВД.

Подвод рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра (варианты 2 и 3), приводит к формированию более равномерной структуры потока с существенно меньшими потерями КЭ, по сравнению с подводом к нижней части цилиндра, что является предпочтительным с аэродинамической точки зрения.

Входное устройство варианта 3 технологичнее варианта 2, а аэродинамические характеристики этих конструкций сопоставимы. По проведенной оценке для турбины К-1000-60/3000, применение входного устройства варианта 3 позволит увеличить внутренний КПД ЦВД на $\approx 0,3\%$. С аэродинамической точки зрения вариант 3 более предпочтителен, однако его применение сопряжено с необходимостью изменения обвязки ЦВД и усложнением эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе выполненного обзора конструкций входных устройств ЦВД, применяемых в современных ПТУ сделан вывод о недостатке информации касательно их конструкций и характеристик. В качестве метода исследования входных устройств выбрано моделирование в CFD пакете FlowSimulation, возможность применения которого основана на результатах сопоставлении данных численного моделирования и экспериментальных исследований.

2. Выполненное сравнение результатов специально поставленного эксперимента с моделью элемента входного устройства и результатов расчетов в пакете FlowSimulation позволяют сделать вывод об удовлетворительной точности

определения потерь КЭ и неравномерности потока. Отклонения расчетных данных от данных эксперимента составляют в среднем менее 8%, что свидетельствует о возможности применения FlowSimulation для оценок аэродинамического совершенства входных устройств с целью определения оптимальной конструкции.

3. Исходный вариант входного устройства соответствует конструкции, широко применяемой в современных отечественных турбинах АЭС, обладающей монтажными и эксплуатационными достоинствами. Для этого варианта интегральный коэффициент потерь КЭ входного устройства составляет $\zeta_{\Sigma 0.2} \approx 0,26$, степень окружной неравномерности потока перед НА $\kappa_{2.2} \approx 0,282$.

4. Для входного устройства варианта 1 с удлиненным цилиндрическим участком сборного коллектора интегральный коэффициент потерь кинетической энергии входного устройства составляет $\zeta_{\Sigma 0.2} \approx 0,251$, степень окружной неравномерности потока перед НА $\kappa_{2.2} \approx 0,27$.

5. В конструкциях исходного и первого вариантов, с подводом рабочего тела к нижней части цилиндра, 90% потерь КЭ относится к области улиток. Важно отметить, что уменьшение степени неравномерности потока за сборным коллектором (за счет его удлинения) практически не повлияло на интегральные потери КЭ входного устройства варианта 1 по сравнению с исходным вариантом, т.е. входные условия не влияют на структуру потока в улитках.

6. Применение конструкции входного устройства варианта 2 с четырьмя радиально расположенными подводными трубами позволяет снизить потери КЭ по величине интегрального коэффициента до $\zeta_{\Sigma 0.2} \approx 0,05$, что на 80% меньше соответствующего коэффициента для исходного варианта. При этом степень неравномерности потока перед ИНР уменьшается на 41% и составляет $\kappa_{2.2} \approx 0,167$.

7. Применение конструкции входного устройства варианта 3 с вертикальным расположением подводных труб позволяет снизить интегральные потери КЭ по сравнению с исходным вариантом на 72% ($\zeta_{\Sigma 0.2} \approx 0,072$) при соответствующем уменьшении окружной неравномерности потока перед ИНР на 28% ($\kappa_{2.2} \approx 0,2$)

8. Неравномерная вихревая структура потока перед ИНР влияет на уровни потерь КЭ в ней. Уменьшение неравномерности потока перед ИНР во входных устройствах вариантов 2 и 3 снижает уровень потерь КЭ по величине $\zeta_{2.3}$ примерно

на 40% по сравнению с исходным вариантом подвода. С некоторым приближением этот вывод может быть использован при оценке влияния неравномерности потока перед НА первой ступени натурного отсека ЦВД.

9. С аэродинамической точки зрения, подвод рабочего тела к верхней и нижней части цилиндра (варианты 2 и 3), является предпочтительным, поскольку он обладает почти в четыре раза меньшим сопротивлением и почти в два раза меньшей неравномерностью потока перед ИНР, в сравнении с подводом к нижней части цилиндра (варианты исходный и первый). Входное устройство варианта 3 технологичнее варианта 2, а их аэродинамические характеристики сопоставимы. По проведенной оценке для турбины К-1000-60/3000, применение входного устройства варианта 3 позволит увеличить внутренний относительный КПД ЦВД на $\approx 0,3\%$. При прочих равных условиях, применение варианта 3 увеличит вибрационную надежность лопаток РК.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Кудрявцев И.А. Численное и экспериментальное исследование потока в подводящем тракте цилиндра высокого давления турбины АЭС // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПбГПУ. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. –С.73-75.

2. Кудрявцев И.А. Аэродинамическое исследование трактов подвода пара ЦВД мощных паровых турбин // Научно-техническая конференция «КОМАНДА-2015»: сборник тезисов – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. –С.112-113.

3. Кудрявцев И.А., Ласкин А.С. Численное и экспериментальное исследование потока в подводящем тракте цилиндра высокого давления турбины АЭС //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №4-1(183). С. 338–344.

4. Кудрявцев И.А., Ласкин А.С. Аэродинамическое совершенствование входных устройств цилиндров высокого давления мощных паровых турбин на основе численного моделирования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. №1(238). С. 7–18.