

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Энергетический  
 Специальность: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
 Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Влияние механизма ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками на величину потерь в турбинной ступени</b>

УДК 621.165-226:532.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<b>5БМ4А</b>	<b>Вальков Георгий Павлович</b>		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>Доцент кафедры атомных и тепловых электростанций</b>	<b>Беляев Л. А.</b>	<b>к.т.н., доцент</b>		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>Ст. преподаватель кафедры менеджмента</b>	<b>Кузьмина Н.Г.</b>	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</b>	<b>Бородин Ю.В.</b>	<b>к.т.н., доцент</b>		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>Ассистент атомных и тепловых электростанций</b>	<b>Мартышев В.Н.</b>	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<b>Атомных и тепловых электростанций</b>	<b>Матвеев А.С.</b>	<b>к.т.н., доцент</b>		

Томск – 2016 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы  
магистра по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Активно</i> владеть <i>иностранном языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	<b>Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития.</b>	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	<b>Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.</b>	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов

		<i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
	<b>Профессиональные компетенции</b>	
P6	Использовать <i>глубокие</i> естественнонаучные, математические и инженерные <i>знания</i> для создания и применения <i>инновационных</i> технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач <i>инженерного анализа</i> , связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое теплотехнологическое</i> оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24, ), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

	производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический  
Направление подготовки **13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**  
Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН  
А.С. Матвеев

\_\_\_\_\_

(Подпись)

\_\_\_\_\_

(Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>магистерской диссертации</b>
(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
<b>5БМ4А</b>	<b>Вальков Георгий Павлович</b>

Тема работы:

<b>Влияние механизма ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками на величину потерь в турбинной ступени</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	<b>20.04.2016, 3056/с</b>

Срок сдачи студентом выполненной работы:

	<b>20 мая 2016 года</b>
--	-------------------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Целью является расчетно-экспериментальное исследование потерь располагаемой энергии от ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками. Объектом исследования в работе является предпоследняя ступень турбины АЭС К-1000-60/3000. Предметом исследования является величина потерь располагаемой энергии от ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками ступени.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Причина увеличения потерь при течении влажного пара в турбинных ступенях.</li> <li>2. Фракции влаги, выделяемые в ступенях турбины.</li> <li>3. Рассогласование движения капель влаги и несущего потока коэффициент скольжения.</li> <li>4. Движение влаги в ступенях паровых турбин</li> <li>5. Эрозия деталей паровых турбин</li> <li>6. Математической модель ударного воздействия капельной влаги на рабочие лопатки</li> <li>7. Заключение</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><b>Финансовый менеджмент</b></p>	<p><b>Кузьмина Н.Г., старший преподаватель кафедры менеджмента</b></p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p><b>Бородин Ю.В., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</b></p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> Обзор литературы. Заключение.</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p><b>28 декабря 2015 года</b></p>
--	------------------------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p><b>Доцент кафедры АТЭС</b></p>	<p><b>Беляев Л. А.</b></p>	<p><b>к.т.н., доцент</b></p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p><b>5БМ4А</b></p>	<p><b>Вальков Г.П.</b></p>		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 97 с., 18 рис., 11 табл., 20 источников, 1 прил.

Ключевые слова: ступень турбины, влажный пар, потеря от удара капли, коэффициент скольжения, коэффициент осаждения.

Объектом исследования является предпоследняя ступень турбины К-1000-60/3000.

Цель работы – определение величины потерь располагаемой энергии от ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками.

В процессе исследования проводились исследования ударного взаимодействия капель влаги с рабочими лопатками .

В результате исследования создана математическая модель процесса ударного взаимодействия капель влаги с рабочими лопатками.

Экономическая эффективность/значимость работы – повышение КПД ступени.

В будущем планируется совершенствование математической модели взаимодействия капель влаги с рабочими лопатками.

## Оглавление

Введение.....	9
1 Обзор литературы.....	11
1.1 Причина увеличения потерь располагаемой энергии при течении влажного пара в турбинных ступенях.....	11
1.2 Фракции влаги, выделяемые в ступенях турбины.....	14
1.3 Рассогласование движения капель влаги и несущего потока коэффициент скольжения.....	15
1.4 Движение влаги в ступенях паровых турбин (сопловые решетки, осевой зазор, рабочие решетки).....	17
1.5 Эрозия деталей паровых турбин .....	26
2 Построение математической модели ударного воздействия капельной влаги на рабочие лопатки.....	31
2.1 Создание модели движения (разгона) капли в зазоре.....	31
2.2 Определение окружной составляющей силы удара капли.....	37
2.3 Определение ударной составляющей потери от влажности.....	39
2.4 Расчет ударной составляющей потерь располагаемой энергии на примере ступени турбины К–1000–60/3000.....	40
3 Результаты проведенного исследования.....	41
2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	44
3 Социальная ответственность.....	60
Заключение.....	74
Список используемых источников.....	75
Приложение А.....	77



## Введение

В настоящее время энергетика является основой для социально-экономического развития страны. Главная часть произведенной электроэнергии в мире приходится на атомную и тепловую энергетику. Имея более ста лет опыта эксплуатации электрических станций, все же остается необходимым решение проблемы повышения надежности и эффективности главного оборудования атомных и тепловых электростанций.

Одним из главных элементов в паросиловом цикле электростанций является паровая турбина. Последние ступени турбин работающих на влажном паре остаются наиболее перспективными элементами для дальнейших исследований.

Характер течения влажного пара в последних ступенях турбины весьма сложен и полностью не изучен ввиду сложности протекающих процессов механического и термодинамического взаимодействия. Следовательно, детальная картина течения двухфазного потока в последних ступенях пока что не построена.

Чтобы повысить экономичность и надёжность паровых турбин необходимо минимизировать негативные эффекты, проявляющиеся при течении двухфазной среды, такие как безвозвратные потери кинетической энергии и эрозионное воздействие на рабочие лопатки.

Полученные за последние сто лет результаты научных исследований служат надежным источником при проектировании новых паротурбинных установок.

Вместе с тем прогресс не стоит на месте, и устойчиво растущий спрос на дешевую электроэнергию ставит перед инженерами новые задачи в совершенствовании конструкции турбин. Все это побуждает к дальнейшему продвижению экспериментальных исследований в данной проблемной области.

Целью данной магистерской диссертации является расчетно-экспериментальное исследование потерь располагаемой энергии от ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками.

Для поставленной цели были определены следующие задачи:

- 1) Обзор литературы по теме исследования;
- 2) Подбор экспериментальных данных для определения составляющих потерь данной ступени;
- 3) Создание математической модели расчета;
- 4) Проведение вариативных расчетов на математической модели;
- 5) Анализ полученных результатов и выводы.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Причина увеличения потерь располагаемой энергии при течении влажного пара в турбинных ступенях

В последних ступенях конденсационных турбин и в большинстве ступеней влажнопаровых турбин, применяемых на атомных электростанциях, процесс расширения пара проходит ниже пограничной кривой, линии насыщения. Таким образом, решетки этих ступеней обтекаются влажным паром, представляющим двухфазную среду, которая включает как паровую, так и жидкую фазу одного вещества – воды [1].

Применяемые на АЭС турбины слабоперегретого и насыщенного пара имеют большое количество последних ступеней работающих на паре с большим содержанием влаги. Имеются и такие турбины, в которых пар во всех ступенях влажный, это турбины насыщенного пара и без промежуточного перегрева.

Исследования, проводившееся на экспериментальных турбинах и на действующих электростанциях, показали, что при работе на влажном паре экономичность ступеней значительно снижается. Это объясняется такими причинами как:

- ударным, тормозящим воздействием частиц жидкости, попадающих на рабочие лопатки;
- потерями энергии на разгон влаги в зазоре в связи с меньшей скоростью влаги, особенно крупнодисперсной, и трением между паром и жидкой фазой;
- дополнительными потерями во вращающейся рабочей решетке, связанными с сепарацией водной пленки, отбрасыванием влаги, увеличением концевых потерь в периферийной зоне и т.д.

В ступенях, где организована специальная сепарация влаги, неизбежен унос из ступени вместе с влагой и части пара. Если этот унос

производится из сопловой решетки или за ней, т.е. до рабочего колеса, то в данной ступени уменьшается полезная работа и, следовательно, снижается КПД [1].

Из-за сложности процесса течения влажного пара в проточной части, весьма затруднительно разработать методику точного расчета всех потерь располагаемой энергии от влажности пара. Далее по тексту под определением «потери энергии» подразумеваем потери располагаемой энергии.

Основные факторы влияющие на потери от влажности в ступени, это влажность пара перед ступенью  $y_0$  и за ступенью  $y_2$ , дисперсность влаги и отношение скоростей  $u/c_\phi$ . Все основные перечисленные факторы учитываются в полуэмпирической формуле расчета потерь от влажности, разработанной в МЭИ:

$$\xi_{вл} = 2 \frac{u}{c_\phi} [0,9 \cdot y + 0,35 \cdot (y_2 - y_0)]; \quad (1.1)$$

В данной формуле первым членом учитывает потери от крупнодисперсной влаги, которая образовалась в предшествующей ступени и определяемая влажностью перед рассчитываемой ступенью  $y_0$ ; вторым членом учитываются потери от мелкодисперсной влаги, образовавшейся в рассчитываемой ступени и равной разности влажностей за и перед ступенью  $y_2 - y_0$ . Коэффициенты 0,9 и 0,35 перед этими членами показывают, что вклад крупнодисперсной влаги в потери энергии значительно больше вклада мелкодисперсной влаги. Формула может быть использована при расчете ступеней, работающих в области невысоких давлений.

В практике расчетов широко используется также приближенная формула оценки потерь от влажности:

$$\xi_{вл} = a \frac{y_2 + y_0}{2}; \quad (1.2)$$

Как показывают опыты, коэффициент,  $a$  в этой формуле изменяется в широких пределах — от 0,4 до 1,4 и более в зависимости от конструкции, параметров и условий работы ступени. Для предварительных расчетов коэффициент  $a$  принимают равным 0,8 — 0,9.

На рисунке 2 приведены потери кинетической энергии, вызванные наличием в потоке влажно парового потока. На диаграмме отображены интегральные потери, рассчитанные в 4 последних ступенях паровой турбины АЭС 1000 МВт. Подробные результаты о распределении различных потерь энергии, связанных с влажным паром, представлены в [5]. Авторы разделили процессы диссипации энергии на следующие категории:

- Термодинамические потери, связанные с процессами теплопередачи между фазами. Включают в себя процессы ядрообразования вблизи зоны Вильсона ( $\Delta q_1$ ).
- Механические потери на разгон мелкодисперсной влаги ( $\Delta q_2$ ).
- Механические потери на разгон крупных частиц влаги ( $\Delta q_3$ ) от выходной кромки сопловой лопатки до входной кромки рабочей.
- Потери на удар при попадании крупных капель на поверхности рабочих лопаток ( $\Delta q_4$ ).
- Потери от формирования пленок на поверхности рабочей лопатки ( $\Delta q_5$ ). Важно подчеркнуть, что в данном случае рассматривается только тот эффект, который связан с исчезновением из межлопаточного канала влаги, которая впоследствии не будет совершать полезную работу.
- Потери от переноса пленки на поверхности рабочей лопатки к периферийным сечением лопатки за счет центробежных сил ( $\Delta q_6$ ).
- Потери с выходной скоростью – разница кинетических энергий между равновесным и неравновесным расширением пара в турбине за последней ступенью ( $\Delta q_7$ ).

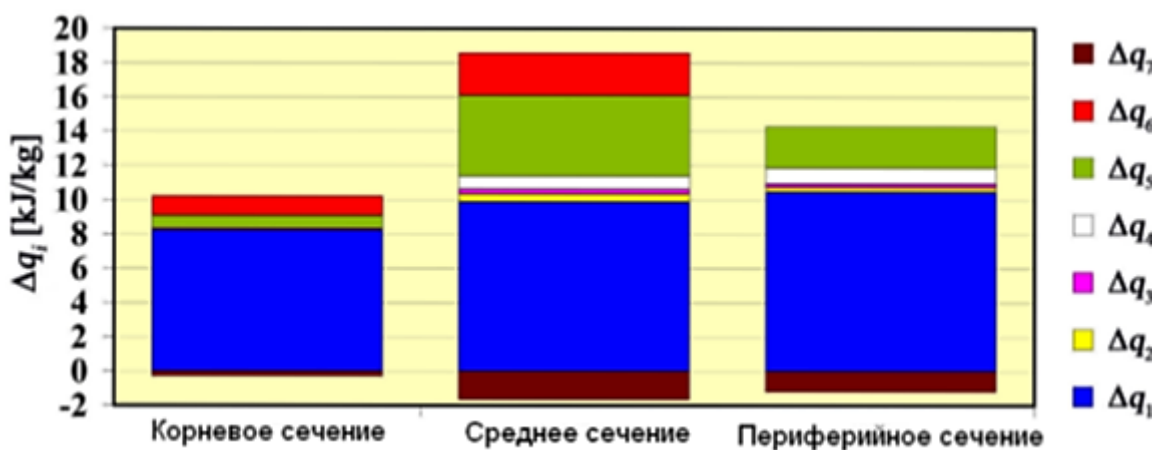


Рисунок 2– Потери энергии от влажности [5]

На представленной диаграмме видно, что наибольший вклад в потери привносят термодинамический процесс конденсации ( $\Delta q_1$ ) и оседание водяных пленок на поверхностях рабочих решеток ( $\Delta q_5$ ). При этом механический разгон крупнодисперсной влаги практически не влияет на эффективность работы паровой турбины. Авторы данной работы считают, что представленные результаты являются неполными, хотя, несомненно, они представляют собой значительный практический интерес [4].

## 1.2 Фракции влаги, выделяемые в ступенях турбины

Если пар на входе в ступень имеет влажность порядка 1-2%, то на стенках профиля сопловой решетки образуется водная пленка. Эта пленка стекает с выходных кромок сопловых лопаток, разрывается и уносится паром по направлению к рабочим лопаткам, причем в закрученном потоке часть влаги стремится к периферии. Жидкую фазу, поступающую на рабочее колесо, можно условно разделить на несколько основных фракций:

а) влага, преимущественно мелкодисперсная, проходящая вместе с паром через рабочую решетку почти без соприкосновения с лопатками и направляемая далее в следующую ступень или выхлопной патрубков;

б) влага, ударяющая во входную часть спинки рабочих лопаток и при  $\beta_1^{ск} < 90^\circ$  частично отбрасываемая обратно в осевой зазор к сопловым

лопаткам в направлении периферии, оттуда снова попадает на рабочие лопатки, и т.д. Эта влага при ударе о поверхность лопаток отбрасывается в поток в виде мелких капель и образует пленку, частично сепарируемую благодаря центробежной силе, частично срываемую с выходных кромок рабочих лопаток [1].

### **1.3 Рассогласование движения капель влаги и несущего потока коэффициент скольжения**

В последних ступенях конденсационных турбин и в большинстве ступеней влажнопаровых турбин, применяемых на атомных электростанциях, процесс расширения пара проходит ниже линии насыщения. Таким образом, решетки этих ступеней обтекаются влажным паром, представляющим двухфазную среду, которая включает как паровую, так и жидкую фазу одного вещества — воды.

Двухфазная среда может находиться в термодинамически устойчивом, равновесном состоянии так и в состоянии временного, неустойчивого равновесия (метастабильное состояние) и в процессе фазового перехода, когда происходит конденсация пара или испарение жидкой фазы.

При неравновесном состоянии двухфазной среды происходит переход одной фазы в другую; скорость этого перехода обозначается  $\chi_{\text{пер}}$ . При испарении жидкости  $\chi_{\text{пер}} < 0$ , при конденсации пара  $\chi_{\text{пер}} > 0$ . Движение двухфазной среды характеризуется разными скоростями фаз, т. е. оно происходит с коэффициентом скольжения  $v = c'/c''$ , равным отношению скоростей жидкой и паровой фаз. Очевидно, что величина  $v$  зависит от многих факторов, в том числе от формы, в какой находится жидкая фаза, от давления среды. Жидкая фаза во влажном паре может находиться в мелкодисперсном состоянии - в виде тумана; в крупнодисперсном состоянии – в виде капель; в виде пленки, движущейся по поверхностям профилей лопаток и торцевым стейкам решеток, а также в виде струй [1].

На рисунке 1 представлены результаты экспериментального исследования [3]. Скорости капель жидкости  $c_k$  и коэффициенты скольжения фаз  $\nu$  вдоль шага на срезе сопловой решетки С-9015А. С ростом начальной влажности  $y_0$  скорость капель влаги и коэффициент скольжения уменьшаются. Характер изменения  $\nu$  вдоль шага в значительной степени определяется размером капель  $d_M^k$  (рисунок 1) которые в ядре потока минимальны, а скорости капель максимальны [3].

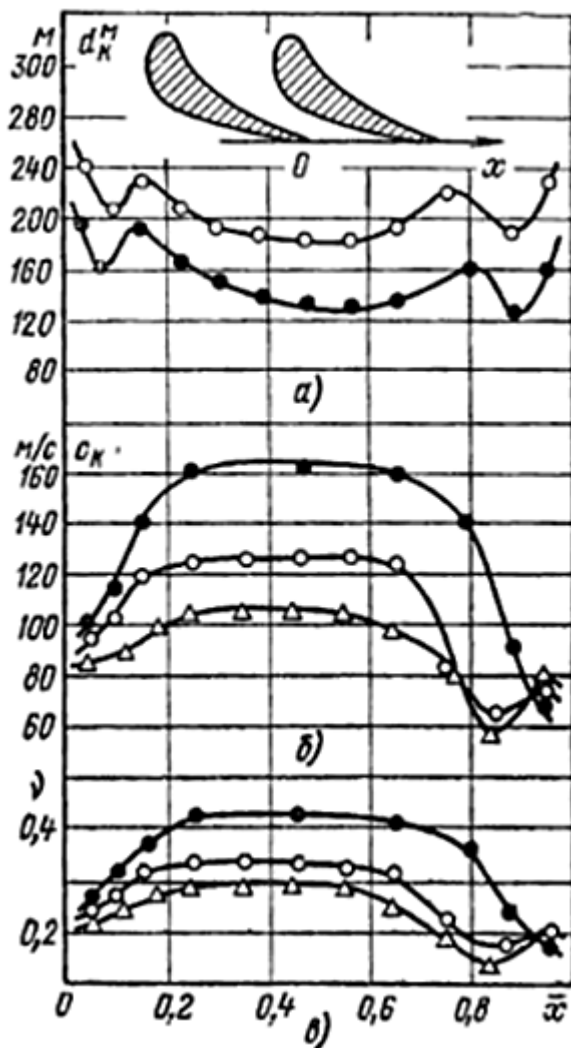


Рисунок 1— Диаметр (а), скорость (б) и скольжение (в) жидкой фазы на срезе сопловой решетки при различной начальной степени влажности. ●—  $y_0=3,2\%$ ,  
○—  $y_0=8\%$ , Δ—  $y_0=13,5\%$  [3]



#### 1.4 Движение влаги в ступенях паровых турбин (сопловые решетки, осевой зазор, рабочие решетки)

Процесс расширения пара в турбинных ступенях с начальной влажностью на входе чрезвычайно сложен. В реальных условиях турбины на входе в решетку капли влаги имеют разную дисперсность и разное распределение в общем объеме, а скорости жидкой фазы отличаются от скорости пара и как величине, так и по направлению, поэтому практически невозможно дать какой-либо общей схемы движения влажного пара.

Траектории капель влаги в канале решетки могут быть различными (рисунок 3) [1]. Капли влаги в паровом потоке могут при этом дробиться, терять устойчивость. Чем крупнее капли, тем, очевидно, больше коэффициент скольжения  $\nu$ . Мелкие капли следуют линиям тока основного потока; скорость их по величине и по направлению мало отличается от скорости пара.

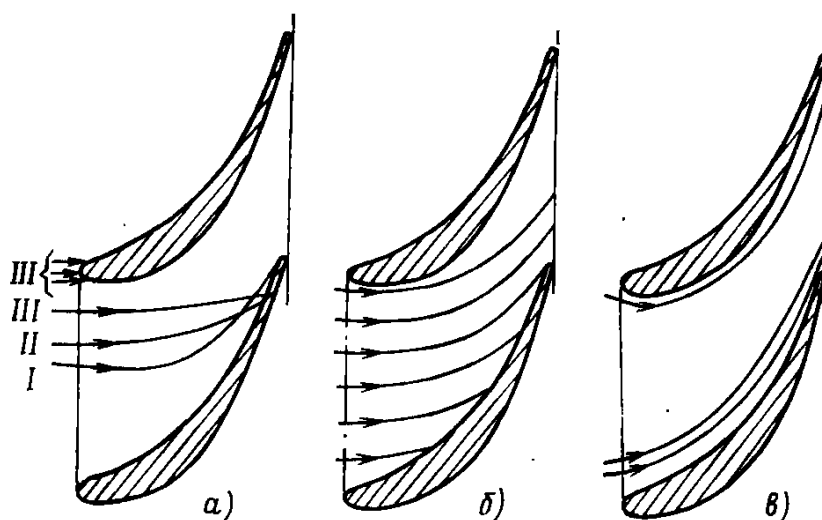


Рисунок 3 – Траектории водяных капель в канале сопловой решетки:

а) – капли на входе разного размера;

I –  $d_k=2$  мкм; II –  $d_k=20$  мкм; III –  $d_k=200$  мкм;

б) – капли на входе одинакового размера;  $d_k=10$  мкм;

в) – капли на входе одинакового размера;  $d_k<1$  мкм [1]

Траектории капель влаги в сопловом канале изображены на рисунке 4. Капли размером порядка  $d_m < 1 \div 5$  мкм (в зависимости от давления) практически следуют линиям тока основного потока и вместе с ним проходят через решетку, не соприкасаясь с поверхностью профиля. Чем больше диаметр капли  $d$ , тем больше траектория отклоняется от линий тока. Очень большие капли диаметром  $d > 50 \div 100$  мкм движутся через сопловый канал почти независимо от направления потока пара. Размеры и форма большинства решеток таковы, что канал или вообще не имеет просвета, т. е. осевая линия, проведенная от входного участка спинки профиля, пересекает соседний профиль, или этот просвет невелик. В первом случае практически все крупные капли будут попадать на вогнутую поверхность; во втором случае это касается только части крупных капель [1].

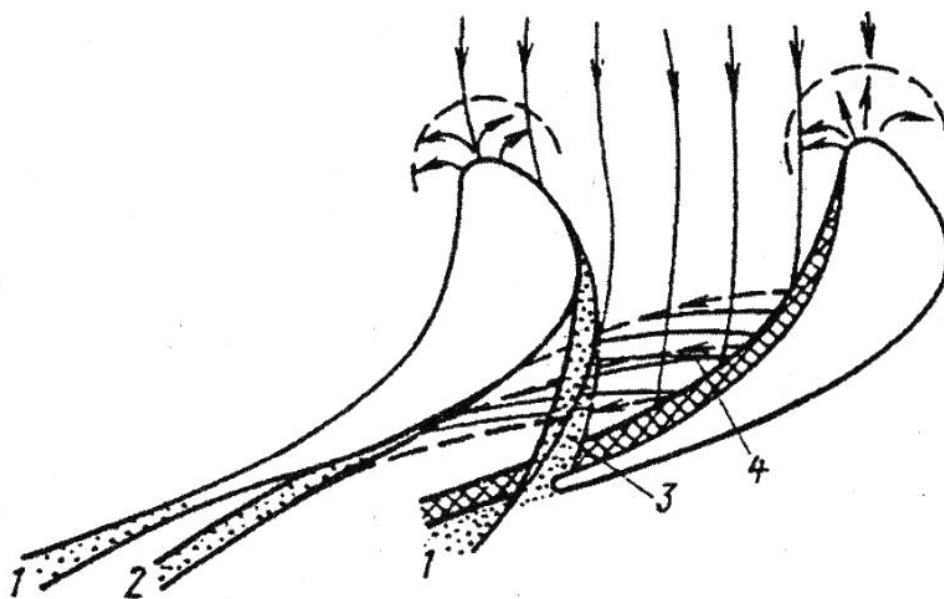


Рисунок 4 – Схема движения частиц влаги в канале сопловой решетки с  $\alpha_0' = 90^\circ$  и  $c_0' = c_0$ : 1 - «кромочный» капельный поток; 2 и 3 - срывные капельные потоки; 4- отраженный капельный поток

Исследования структуры крупнодисперсной влаги за решетками проводились в МЭИ принцип работы которого заключается в инерционном осаждении капель влаги на покрытую вязким маслом пластину, помещенную

в осевой зазор [6]. Полученные отпечатки фотографировались под микроскопом, а последующая обработка экспериментальных данных позволяла построить для каждой точки потока функции распределения массы и определить количество движущихся капель одинакового диаметра.

На рисунке 5 представлены результаты экспериментального исследования структуры двухфазного потока в разных точках вдоль плоскости выходных кромок сопловой решетки С-9012А ( $\bar{x}=x/t=0,1$ ;  $\bar{t}=0,75$ ;  $v=72,5$  мм) [30]. На входе перед решеткой массовый модальный размер капель был несколько больше  $55 \cdot 10^{-6}$  м. Начальная степень влажности составляла  $y_0=2,5\%$ . Из рисунка видно, что в разных точках наблюдаются многопиковые характеристики. Это объясняется прежде всего наличием нескольких источников образования капель различного размера. К ним относятся зоны, где происходят отрыв пленок, дробление и отражение падающих капель и др. Естественно, что в результате каждого из этих процессов образуются частицы своего характерного размера, который зависит от конкретных условий в месте их возникновения. Наиболее крупными являются капли, образующиеся в закрюночных следах решетки ( $\bar{z}=0$ ). Следует отметить существенное уменьшение размеров капель в кромочном следе при применении отсоса пленки через щель, расположенную в выходной кромке лопатки (кривая 2 на рис. 5,в). При модальном размере капель на входе  $80 \cdot 10^{-6}$  м осредненный размер капель по массе за кромкой составлял  $d_k^M=280 \cdot 10^{-6}$  м, в то время как в опытах с отсосом размер капель уменьшился примерно до  $d_k^M \approx (800 \div 100) \cdot 10^{-6}$  м.

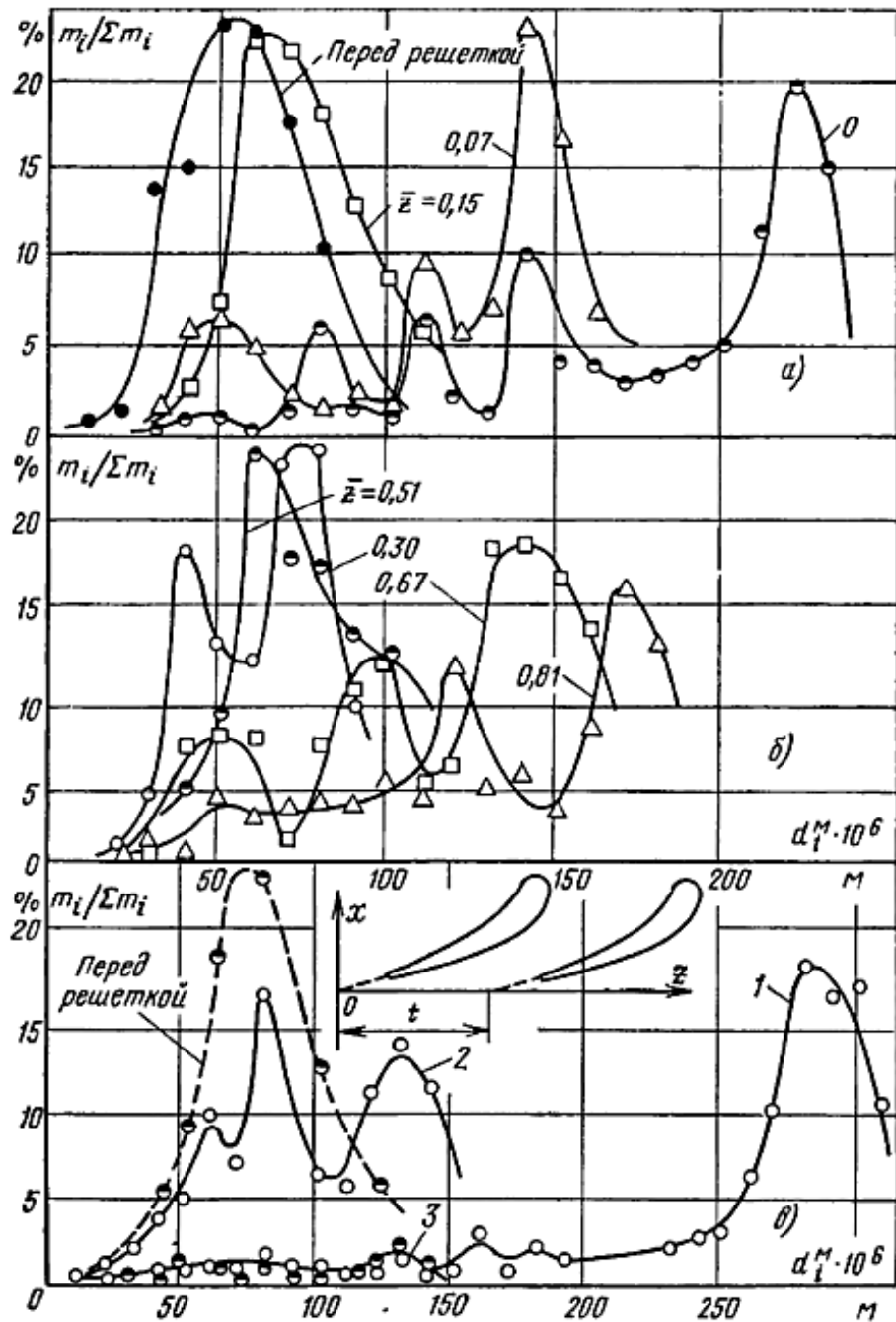


Рисунок 5. Дисперсность влаги за сопловой решеткой [3]

а, б — зависимость  $m_i/\Sigma m_i$  модального диаметра капель по шагу сопловой решетки; в — влияние кромочной сепарации влаги на дисперсность; 1 — без отсоса пленки; 2 — с отсосом пленки; 3 — с отсосом пленки ( $y_0=4,5\%$ ;  $M=0,65$ ;  $\bar{t}=0,76$ ;  $x=5$  мм)

Так же, авторами [5] представлены зависимости распределения расходного (среднемассового) диаметра капель вдоль шага решетки при различных начальной влажности и шаге решеток (рисунке 6). Максимальный размер капель обнаруживается в закрюченном следе. При удалении от кромки вдоль оси  $z$   $d_K$  уменьшается, хотя четкая по дисперсности граница кромочного следа имеет место только со стороны спинки профиля лопатки. Измерения показали также наличие крупных капель в ядре потока примерно на расстоянии  $z=0,2 \div 0,35$  от кромочного следа со стороны спинки лопатки. Второй пик наблюдается при  $z \approx 0,65$ , т. е. на линиях тока вблизи вогнутой поверхности лопатки. Возникновение крупнодисперсной влаги в ядре потока можно объяснить отрывом пленок с поверхностей лопатки и дроблением (рикошетированием) капель влаги при соприкосновении со смоченной поверхностью лопатки. В опытах обнаружен также рост среднего размера капель за решеткой при увеличении начальной влажности потока (рисунок 6,а). Следует при этом отметить, что модельный размер капель перед решеткой оставался практически постоянным:  $d_K^M \approx (55 \div 65) \cdot 10^{-6}$  м [3].

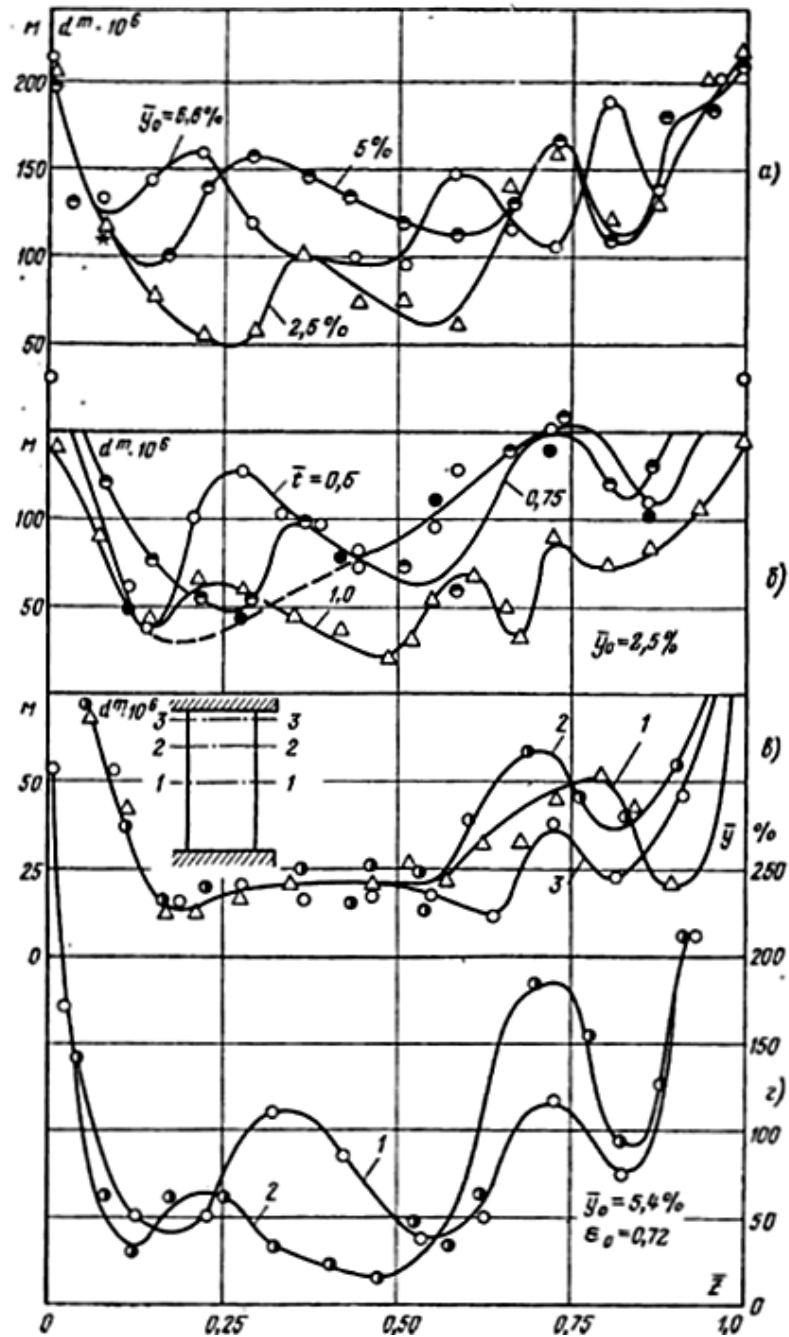


Рисунок 6. Влияние режимных и геометрических параметров на размер капель за сопловой турбинной решеткой с профилем С-9012А [3]  
а – влияние степени влажности пара [ $\bar{t}=0,75$ ;  $\varepsilon=0,72$ ;  $Re=7 \cdot 10^5$ ;  $b=72,5$  мм;  $d_0=(55 \div 65) \cdot 10^{-6}$  м]; б–влияние относительного шага решетки  $\bar{t}$  ;  
в–дисперсность в различных сечениях по высоте решетки [ $y_0=1,3\%$ ;  $\varepsilon=0,72$ ;  $Re=9 \cdot 10^5$ ]; г — влияние угла выхода потока  $\alpha_1$

Авторами [3] производился расчет движения крупнодисперсной влаги для ЦНД турбин. Рассматривалось характерное движение частиц частицы влаги с длинными закрученными лопатками. Расчет траекторий влаги в отдельных сечениях таких ступеней позволяет с достаточной точностью проанализировать движение капель практически во всех ступенях турбин.

Программа на расчета на ЭВМ позволяет определять траекторию капель непрерывно в сопловом канале, в зазоре между сопловыми и рабочими лопатками и в рабочей решетке, причем расчет до сечения  $A-A$  (рисунок 7) ведется в абсолютном движении, а ниже по потоку пара траектории представлены в относительном движении.

Капля диаметром  $d_k=100 \cdot 10^{-6}$  попадает в точку 0 на поверхности сопловой лопатки (рисунок 7). В результате взаимодействия с поверхностью она раздробится и отразится в поток, при этом в зависимости от размера отразившихся частиц и дальнейшие траектории будут существенно различны. Расчет траекторий отразившихся частиц трех различных диаметров показывает, что крупные капли после отражения пересекут канал и достигнут вогнутой поверхности соседней лопатки в точке 1, мелкие же капли выносятся потоком из канала сопловой решетки. Капли, достигшие поверхности лопатки в точке 1, также отражаются в поток. Расчеты показывают, что в сопловом канале с лопатками ТС-1А случай, когда влага, отраженная от вогнутой поверхности лопатки, пересечет канал и достигнет спинки соседней лопатки, маловероятен.

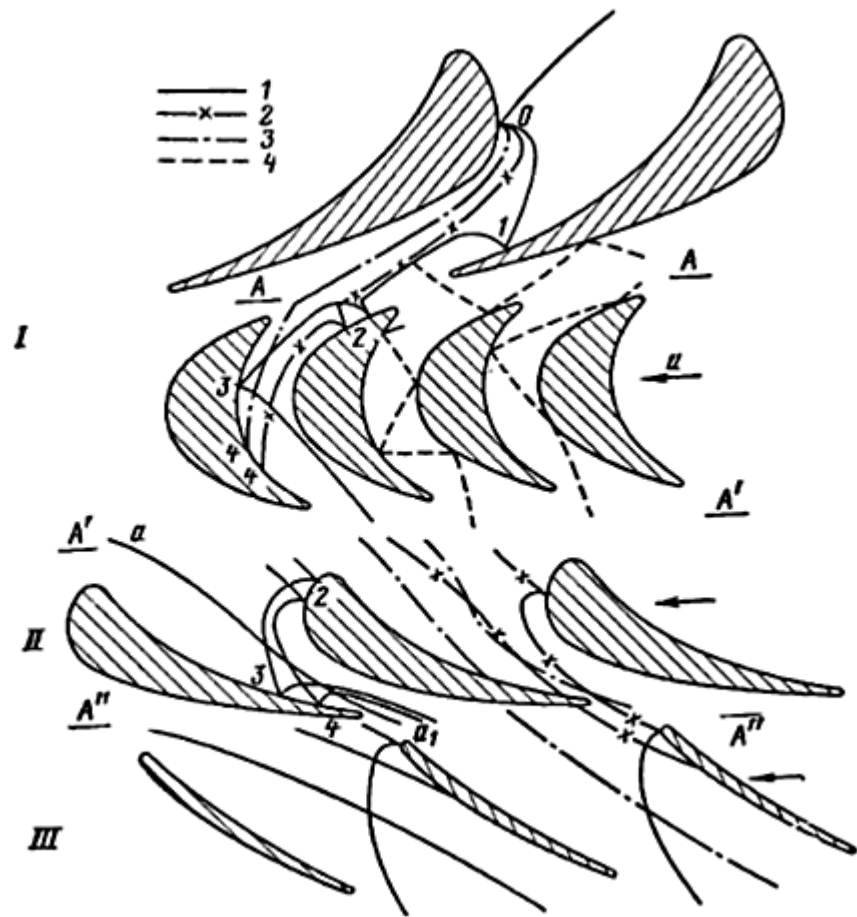


Рисунок 7– Расчетные траектории движения влаги с отражением от поверхности лопаток в турбинной ступени [3]

1–  $d_k=75 \cdot 10^{-6}$  м; 2–  $d_k=30 \cdot 10^{-6}$  м; 3–  $d_k=5 \cdot 10^{-6}$  м ; 4 — твердые частицы;

I–рабочие лопатки активного типа; II–рабочие лопатки реактивного типа; III –рабочие лопатки периферийного сечения длинных лопаток

Крупные капли, пересекая осевой зазор, попадают на поверхность входных кромок рабочих лопаток со стороны спинки и отражаются. Здесь интересным представляется случай, когда отраженная влага может пересечь осевой зазор и достигнуть выходных кромок направляющих лопаток. В принципе в осевом зазоре турбинной ступени может быть реализован процесс многократного соударения капель с входными кромками рабочих лопаток и выходными сопловых, как это показано на рисунке 8. Как следует из расчетов, такое движение влаги в зазоре с ростом плотности пара



уменьшается и вероятность попадания мелких частиц влаги после рабочих лопаток на выходные кромки сопел мала. Так, например, при давлении пара в зазоре  $p=0,5\text{МПа}$  капли, диаметр которых меньше  $76\cdot 10^{-6}$  м, отражаются против пара не более чем на 4 мм. Поэтому известные случаи разрушения поверхности выходных кромок сопел в ЦВД турбин влажного пара могут быть объяснены воздействием только крупных частиц ( $d_k > 100\cdot 10^{-6}$  м), отраженных с выходных кромок рабочих лопаток.

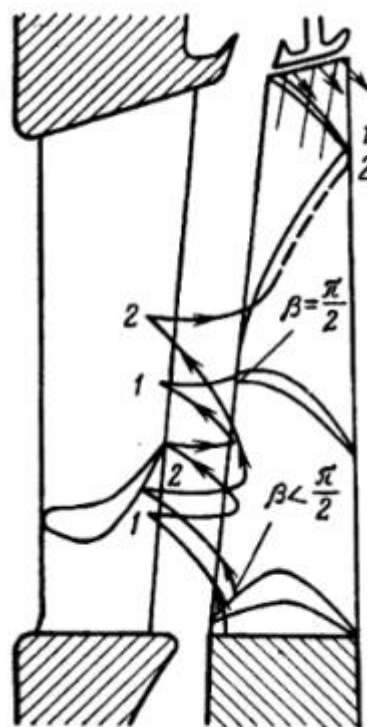


Рисунок 8— Характерное движение крупных капель в осевом зазоре [3]

Частицы влаги ( $d_k=75\cdot 10^{-6}$  м на рисунке 8), попадая в точку 2 входной кромки рабочей лопатки, движутся в канал рабочей решетки и попадают на соседнюю лопатку в точке 3. Нормальная скорость соударения влаги в точке 3 велика и здесь вновь происходит отражение влаги. На рисунке 8 отражение капли в точках 1, 2, 3 показано без дробления ее на мелкие частицы, в действительности в каждой зоне соударения будет появляться группа более мелких капель, как показано в начальной точке 0.

Однако влага не всегда будет отражаться от вогнутой поверхности рабочих лопаток. В зависимости от угла взаимодействия и нормальной скорости взаимодействия капли могут не отражаться от лопатки, как, например, в точке 4 (сечение I). Зоны рабочих лопаток, где соударение происходит без отражения жидких частиц, должны обладать максимальной эффективностью сепарации влаги [3].

Для сравнения на рисунке 8 показаны траектории движения твердых сферических частиц. Видно, что твердые частицы совершают многократные соударения с рабочими лопатками и выходными кромками направляющего аппарата.

Естественно, что движение, соударение и отражение влаги существенно зависят от режимных и геометрических параметров турбинных ступеней. Уточнение углов и скоростей отражения влаги, а также выявление влияния пограничного слоя на соударение позволят приблизить расчет к реальному процессу движения влаги. Дальнейшие экспериментальные и расчетно-теоретические исследования позволяют наметить пути совершенствования турбинных ступеней с целью повышения их экономичности, надежности и сепарирующей способности.

### **1.5 Эрозия деталей паровых турбин**

В паровых турбинах ударному эрозионному износу подвержены рабочие лопатки последних и предпоследних ступеней конденсационных турбин. В местах, где поток пара с повышенным содержанием влаги имеет высокую скорость, в особенности в ЦВД турбин АЭС, работающих на влажном паре, наблюдается износ от щелевой эрозии корпусов, обойм, диафрагм, арматуры и других деталей [2].

Эрозионный износ рабочих лопаток при ударах капель влаги о поверхность входных кромок лопаток проявляется вначале в появлении шероховатости поверхности, затем на поверхности образуются углубления,

кратеры, язвины, искажается форма профиля лопаток. При длительной работе возможно постепенное полное разрушение верхней части рабочей лопатки. В результате снижаются механическая прочность эродированных лопаток и КПД ступени.

Механизм эрозионного износа рабочих лопаток связан в основном с усталостным разрушением материала лопаток из-за высоких механических напряжений, которые возникают при ударе капли влаги о поверхность лопатки. Давление при соударении капли с поверхностью лопатки может быть определено на основе уравнения гидравлического удара Н.Е. Жуковского по формуле

$$p = \alpha \rho_{\text{вл}} w_{\text{вл}} \alpha_{\text{вл}}, \quad (1.3)$$

где  $\rho_{\text{вл}}$  — плотность жидкости в канале;  $w_{\text{вл}}$  — скорость капли относительно поверхности лопатки;  $\alpha_{\text{вл}}$  — скорость звука в жидкости;  $\alpha$  — коэффициент, изменяющийся в зависимости от скорости капли  $w_{\text{вл}}$  от 0,25 до 0,5; при  $w_{\text{вл}} > 150 \text{ м/с}$   $\alpha = 0,5$  [2].

На эрозионный процесс кроме механических напряжений могут оказывать влияние коррозия металла, кавитация и т.п.

Различают три периода в развитии эрозионного износа лопаток (рисунок 9):

I — инкубационный период когда в поверхностном слое материала накапливаются усталостные повреждения (образование и рост усталостных трещин);

II — период интенсивной эрозии;

III — период замедленного темпа эрозии.

Продолжительность этих периодов зависит от влажности пара, дисперсности влаги, скорости капель в момент соударения с поверхностью

лопатки, Замедление темпов эрозии в третьем периоде обусловлено демпфированием удара за счет влаги, находящейся в кавернах

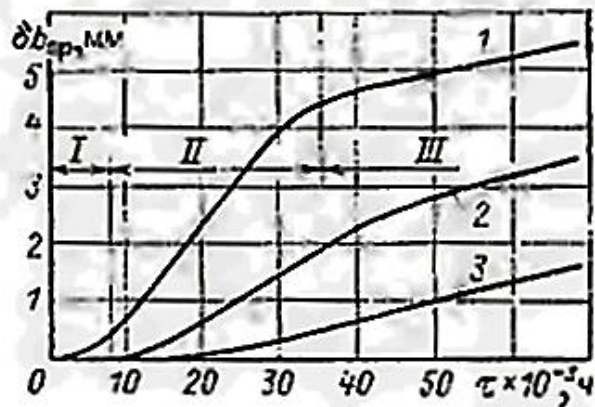


Рисунок 9 – Средняя глубина эрозионного изъедания входных кромок лопаток в зависимости от времени работы:

1–для последней ступени; 2–предпоследней ступени; 3–третьей от выхода ступени [9]

Износ поверхностей лопаток во времени весьма неравномерен. На рисунке 9 представленные кривые, характеризующие эрозию входных кромок лопаток в наиболее изнашиваемых сечениях для трех последних ступеней одной из турбин [9].

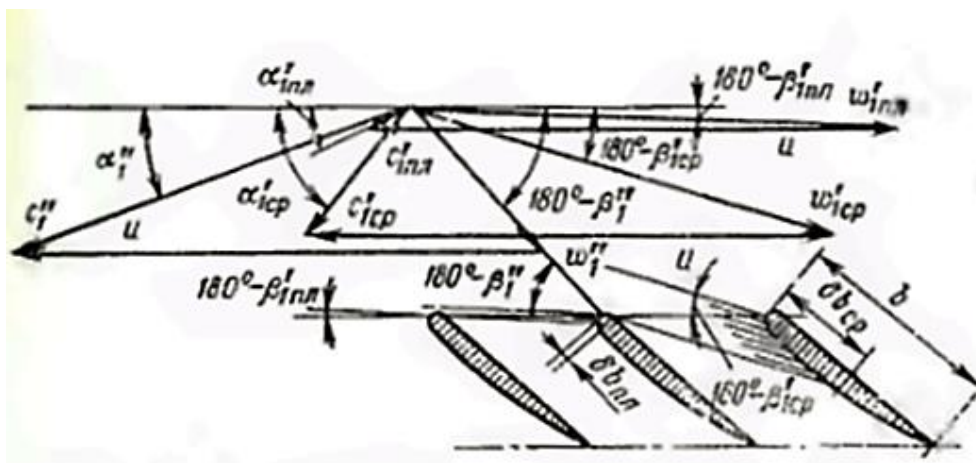


Рисунок 10– Треугольник скоростей и крупных капель пара в периферийной зоне лопаток ступени [9]

На рисунке 10 показаны профили рабочих решеток в периферийной зоне и треугольники скоростей пара и крупных капель. Пар входит в каналы рабочих решеток с относительной скоростью  $w_1''$ , а капли влаги, образовавшиеся при сходе жидкой пленки с сопловых лопаток, с поверхностей внутреннего периферийного обвода диафрагмы попадают на рабочие лопатки с существенно большей скоростью  $w_{пл}''$  близкой по величине к окружной скорости и в этом сечении. Эти капли попадают на поверхность рабочих лопаток, на спинку профиля в зоне входных кромок, обозначенную на рисунке 10 через  $\delta b_{пл}$ . Капли других, меньших размеров, например образовавшиеся в результате отражения и срыва с поверхностей сопловых лопаток, имеют иные абсолютные скорости  $c''_{1cp}$  и углы  $\alpha'_{1cp}$  и соответственно другие значения скоростей  $w''_{1cp}$  и углов входа  $\beta''_{1cp}$ . Эрозионный износ охватывает размытую зону поверхности рабочих лопаток. Эта поверхность сначала становится шероховатой, затем появляются язвины, более крупные впадины, и, наконец, периферийная зона входного участка рабочих лопаток становится похожей на губку, лопатки теряют заметную часть своей массы (рисунок 10).

Снижение надежности и экономичности, вызываемые эрозионным разрушением различных элементов турбин, работающих на влажном паре, вызывает необходимость применения различных методов защиты от эрозии:

а) уменьшение влажности пара с помощью специальных влагоулавливающих и сепарационных устройств;

б) применения материалов, имеющих высокую (в том числе коррозионную) стойкость с учетом всего комплекса факторов, действующих на материал в процессе его эрозии;

в) нанесения на основной материал лопаток специальных покрытий, имеющих повышенную эрозионную стойкость;

г) упрочнения поверхности лопаток или отдельных их участков;

д) совершенствования технологии изготовления лопаток и других элементов проточной части с целью сведения к минимуму возможности появления на их поверхности технологических дефектов;

е) рационального выбора конструктивных и газодинамических параметров при проектировании турбин;

ж) совершенствования качества эксплуатации турбин (улучшение химического состава питательной воды, выбор рациональной схемы и методики кислотной промывки энергооборудования, своевременный и качественный ремонт рабочих поверхностей в местах начальной эрозии и т. д.).

Эффективным средством снижения эрозии проточных частей турбин является сепарация влаги в проточных частях турбин [9].

## 2 Построение математической модели ударного воздействия капельной влаги на рабочие лопатки

Математическое моделирование влияния механизма ударного воздействия частиц влаги на рабочие лопатки делятся на четыре этапа:

1. Создание модели движения (разгона) капли в зазоре;
2. Определение окружной составляющей силы удара капли;
3. Определение ударной составляющей потери от влажности;
4. Расчет ударной составляющей потерь располагаемой энергии на примере ступени турбины К-1000–60/3000.

Рассмотрим эти этапы подробно.

### 2.1 Создание модели движения (разгона) капли в зазоре

Для создания модели движения капли в осевом зазоре турбинной ступени необходимо рассматривать силы, действующие на каплю в несущем потоке. Рассмотрим эти силы, действующие на частицу в двух противоположных случаях: скорость газовой фазы  $\vec{C}_1$  больше скорости  $\vec{C}_k$  и наоборот. Соответствующие схемы сил [8] представлены на рисунке 11.

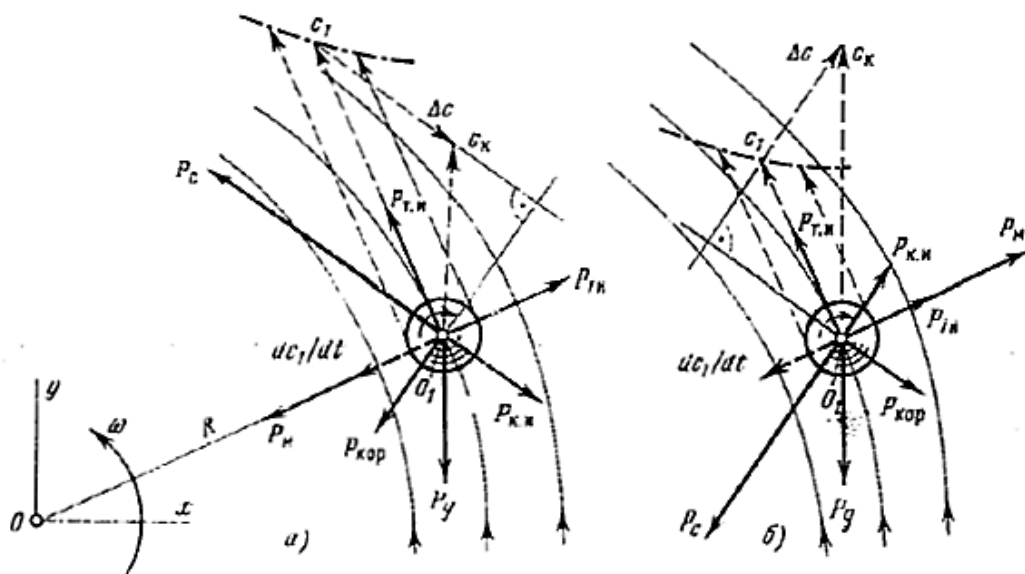


Рисунок 11– Силы, действующие на каплю в несущем потоке[8]

На схемах показаны (жирными линиями):  $\vec{P}_c$  – сила аэродинамического сопротивления частицы, вектор которой параллелен вектору относительной скорости  $\vec{\Delta c}$ ; силы инерции, обусловленные реакцией частицы на изменение скорости газовой среды:  $P_{1и} = m_k dc_1/dt$ ,  $P_{к.и} = -m_k d(\Delta c)/dt$ , кориолисова сила  $P_{кор} = -m_k 2\omega_1 c_1/dt$  ( $\omega$  – угловая скорость газа относительно точки О); сила гравитационного поля  $P_g = -m_k g$ ; сила Магнуса  $P_M$ , обусловленная вращательным движением частицы с угловой скоростью  $\omega$ . Относительная скорость частицы  $\vec{\Delta c} = \vec{c}_1 - \vec{c}_k$ , скорости  $c_k$ , и  $\Delta c$  обозначены штриховыми, а распределение скоростей в несущем потоке – штрихпунктирными линиями.

Как показывают исследования [8], основными силой, действующими на частицу в потоке, применительно к ступеням паровых турбин, оказывается только сила аэродинамического сопротивления.

Силу аэродинамического сопротивления можно записать в виде:

$$\vec{P}_a = m_k \cdot \vec{a}_k ; \quad (2.1)$$

где  $m_k$  – масса капли,  $\vec{a}_k$  – вектор ускорения капли.

$$\vec{P}_a = \frac{1}{2} C_x S_k \rho_k |\vec{c}_n - \vec{c}_k| (\vec{c}_n - \vec{c}_k); \quad (2.2)$$

где  $S_k$  – площадь поперечного сечения капли;  $C_k$  – коэффициент, учитывающий аэродинамическое сопротивление капли,  $\vec{c}_n$  – вектор скорости парового потока;  $\vec{c}_k$  – вектор скорости капель влаги,  $\rho_k$  – плотность капли.

Масса капли определяется как:

$$m_k = \frac{4}{3} \pi r_k^3 \rho_k ; \quad (2.3)$$

где  $r_k$  – радиус капли.



Величина коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  является важной характеристикой, которая непосредственно влияет на точность расчета. В целом  $C_x$  определяется рядом факторов и прежде всего относительным числом  $Re_k$  для капли:

$$Re_k = \frac{\rho_n (c_n - c_k)}{\mu_n} d_k, \quad (2.4)$$

где  $\mu_n$  - динамическая вязкость,  $\rho_n$  - плотность несущего потока,  $d_k$  - диаметр капли.

Так же на величину  $C_x$  существенно влияет сжимаемость несущей среды. Влияние сжимаемости оценивается следующим выражением [10]:

$$f(M) = \frac{c_x}{c_{x0}} = \frac{1 + e^{\frac{0,4273}{M^{4,63} \cdot Re_k}}}{1 + \frac{M}{Re_k} \left[ 3,82 + 1,28 e^{-1,25 \frac{Re_k}{M}} \right]}, \quad (2.5)$$

Таким образом, в качестве определяющих характеристик величины  $C_x$  в работе используются  $Re_k$  и  $M$ .

Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от  $Re_k$  находилась, используя метод, изложенный в [20]. Основным достоинством выбранной зависимости является плавность перехода значений  $C_{x0}$  на границах  $Re_k$ . Вид аппроксимирующей функции представлен на рисунке 12.

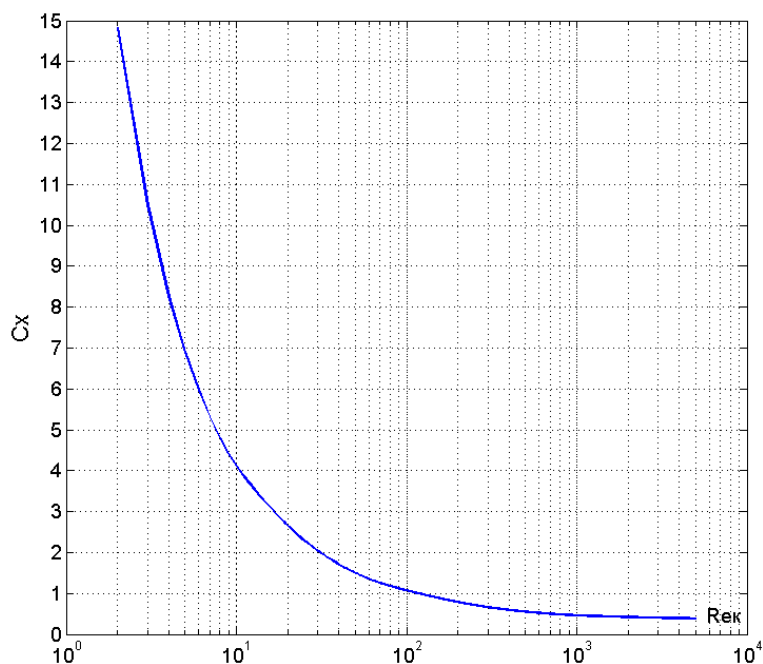


Рисунок 12– Зависимость  $C_{x0}$  от  $Re_k$

Окончательное выражение для величины  $C_x$  будет выглядеть:

$$C_x = C_{x0} f(M); \quad (2.6)$$

Расчет произведен с учетом двух приближений:

1. Скорость несущего потока и коэффициент скольжения неизменны, а скорость капель переменна по шагу решетки
2. Скорость несущего потока в осевом зазоре между сопловыми и рабочими решетками неизменна.

Исходными данными для определения разгона капли в зазоре являлись:

$\alpha_1'$  – угол вектора скорости капли на выходе сопловой решетки;

$\alpha_1$  – угол выхода потока на выходе сопловой решетки;

$d_k$  – средний диаметр капли;

$c_{п}$  – скорость несущего потока;

$c_{1к}$  – скорость капли определенная через коэффициент скольжения  $\nu = \frac{c_{к}}{c_{п}}$ , взятый из результатов экспериментального исследования [3].

Введем следующую систему координат: осевое направление совпадает с осью турбины – ось  $a$ , окружное направление – ось  $u$  (рисунок 13).

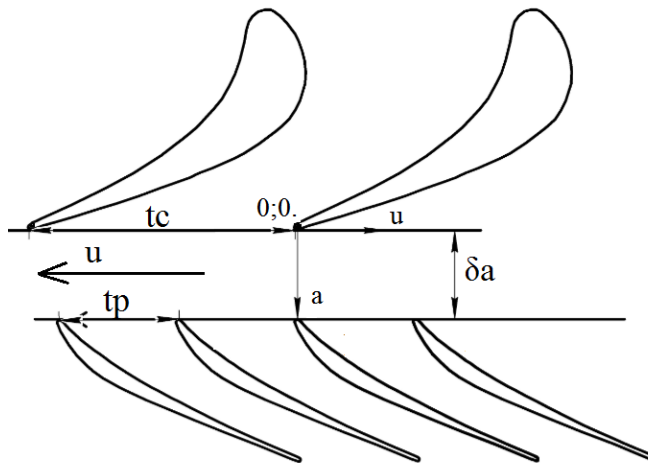


Рисунок 13 – Координатная плоскость

Рассматриваем проекции абсолютных скоростей на две оси координат.

Проекции скоростей потока и капли на осевое направление запишем в виде:

$$c_{1к}^a = c_{1к} \cdot \sin \alpha_1'; \quad (2.7)$$

$$c_1^a = c_1 \cdot \sin \alpha_1; \quad (2.8)$$

Проекции скоростей потока и капли на окружное направление:

$$c_{1к}^u = c_{1к} \cdot \cos \alpha_1'; \quad (2.9)$$

$$c_1^u = c_1 \cdot \cos \alpha_1; \quad (2.10)$$

Учитывая все это, уравнение движения в проекции на осевое направление опишется выражением:

$$\frac{1}{2} S_{\kappa} C_{\kappa} \rho_{\kappa} (c_{1\kappa} \cdot \sin \alpha_1 - c_{1\kappa} \cdot \sin \alpha_1')^2 = m_{\kappa} \frac{dc_{\kappa}}{d\tau}; \quad (2.11)$$

Уравнение в проекции на окружное направление:

$$\frac{1}{2} S_{\kappa} C_{\kappa} \rho_{\kappa} (c_1 \cdot \cos \alpha_1 - c_{1\kappa} \cdot \cos \alpha_1')^2 = m_{\kappa} \frac{dc_{\kappa}}{d\tau}; \quad (2.12)$$

Получившиеся выражения представлены в виде обобщенной рекуррентной формулы:

$$C_{1\kappa}^{i+1} = [A_3(C_{1\kappa}^i)^2 - A_2(C_{1\kappa}^i) + A_1] \cdot \Delta\tau + C_{1\kappa}^i; \quad (2.13)$$

где коэффициенты для проекции скорости на осевое направление:

$$A_1 = \frac{S \cdot C_x \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot m_{\kappa}} \cdot (C_1 \cdot \sin \alpha_1)^2; \quad (2.14)$$

$$A_2 = \frac{S \cdot C_x \cdot \rho_{\Pi}}{m_{\kappa}} \cdot C_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1'; \quad (2.15)$$

$$A_3 = \frac{S \cdot C_x \cdot \rho_{\Pi}}{m_{\kappa}} \cdot \sin \alpha_1'; \quad (2.16)$$

коэффициенты для проекции скорости на окружное направление:

$$A_1 = \frac{S \cdot C_x \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot m_{\kappa}} \cdot (C_1 \cdot \cos \alpha_1)^2; \quad (2.17)$$

$$A_2 = \frac{S \cdot C_x \cdot \rho_{\Pi}}{m_{\kappa}} \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1'; \quad (2.18)$$

$$A_3 = \frac{S \cdot C_x \cdot \rho_{\Pi}}{m_{\kappa}} \cdot \cos \alpha_1'. \quad (2.19)$$

Решая эти уравнения, методом последовательных приближений получаем выражение для скорости капли в осевом зазоре ступени в различный момент времени.

Далее рассматривалось движение частицы, дискретно по шагу.

Алгоритм расчета движения капли в осевом зазоре:

1. Определяется расчетная точка по шагу сопловой решетки  $\tilde{t} = t_{\text{тек}}/t$ .

2. Определяется значение среднемассового  $d_k$  в расчете (по результатам эксперимента [3]).
3. Определяется скорость капли  $c_k$  (по результатам эксперимента [3]).
4. Решением уравнений (2.11, 2.12) рассчитывается разгон капли в осевом зазоре ступени до момента пересечения фронта рабочей решетки.

## 2.2 Определение окружной составляющей силы удара капли.

Сила, с которой капли влаги действуют на рабочую лопатку, определялась на основании уравнения количества движения, согласно которому изменение импульса силы равно изменению количества движения:

$$F_u \Delta\tau = \Delta(mW); \quad (2.20)$$

где  $F_u$  – окружная сила действующая на лопатку,  $\Delta(mW)$  – количество движения,  $\Delta\tau$  – время воздействия.

Изменение количества движения:

$$\Delta(mW) = m_{0k} \cdot W_0 - m_{1k} \cdot W_1; \quad (2.21)$$

где  $m_{0k}$  – масса капли до удара,  $m_{1k}$  – после удара.

Так как рабочие лопатки движутся с окружной скоростью  $U$ , то капли влаги движутся в момент взаимодействия относительно рабочих лопаток  $W_{1k}$ , определяемой из треугольника скоростей рисунок 14.

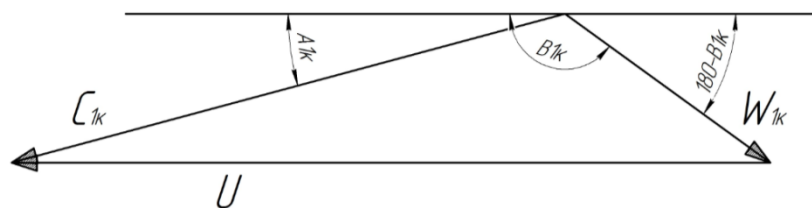


Рисунок 14 – Треугольник скоростей капли

В данной работе предполагается равенство скоростей частиц до и после удара:  $W_0 = W_1 = W_{1к}$ , следовательно:

$$\Delta(mW) = W_{1к} \cdot (m_{0к} - m_{1к}). \quad (2.22)$$

Соотношение между  $m_{0к}$  и  $m_{1к}$  определялось по результатам эксперимента  $\frac{m_{0к}}{m_{1к}} = f(\eta_{пл})$  [3]. Для определения  $\eta_{пл}$  необходимо знать угол взаимодействия капли с поверхностью профиля.

Для решения этой задачи входной участок лопатки (P-3021A) был аппроксимирован уравнением  $y = 0,0006 \cdot x^3 - 0,0505 \cdot x^2 + 2,0994 \cdot x + 2,0925$ .

Уравнение нормали к кривой задается уравнением  $y = f(x)$  и определяется таким образом:

К каждому слагаемому уравнения  $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$  нужно прибавить длину  $l$ , для смещения влево. Тогда уравнение примет вид:

$$a(x + l)^3 + b(x + l)^2 + c(x + l) + d + K_1 = 0. \quad (2.23)$$

Следовательно, для получения уравнения нормали необходимо определить точку  $M_0$ , точку в которой происходит удар капли о лопатку. Для этого необходимо найти точку пересечения вектора скорости  $\vec{W}_{1к}$  и профиля со смещением. Точка пересечения находится методом половинного деления.

Определённые координаты точки удара позволяют получить уравнение нормали к профилю рабочей лопатки.

Уравнение нормали:

$$y_2 = -\frac{1}{y'(x_0)} x^2 + \left[ \frac{x_0}{y'(x_0)} + y \right]^2; \quad (2.24)$$

Далее определяем угол между нормалью и вектором скорости капли (угол взаимодействия капли с поверхностью профиля) выражением:

$$\theta = \arctg \left( \frac{1 + \operatorname{tg}(180 - \alpha_{1к}) \cdot y'(x_0)}{\operatorname{tg}(180 - \alpha_{1к}) - y'(x_0)} \right); \quad (2.25)$$

где  $y' = 3ax^3 + 2x[3al + b] + [3al^2 + 2bl + c]$  – вектор скорости.

Определив все необходимые параметры находим коэффициент осаждения  $\eta_{пл} = f(\theta, W_{1к})$ , который позволяет рассчитать силу удара  $F_u$ .

### 2.3 Определение ударной составляющей потери от влажности

Учитываем, что тормозящее действие оказывает только окружная составляющая усилия, направленная против вектора скорости решетки.

Сила удара одной капли в проекции на ось  $u$  будет иметь вид:

$$F_u = W_{1к} \frac{(m_{ок} - m_{1к})}{\Delta\tau} \cos(180 - \beta_{1к}). \quad (2.26)$$

Мощность, потерянная от удара капель:

$$\Delta N_{уд} = F_u U; \quad (2.27)$$

где  $U$  – окружная скорость.

Мощность выработанной ступенью:

$$N_{ст} = R_u \cdot \Delta\tau; \quad (2.28)$$

$$R_u = G(W_1 \cos\beta_1 + W_2 \cos\beta_2); \quad (2.29)$$

Где  $G$  – расход пара на ступень.

Далее определяем коэффициент, учитывающий потери от ударного взаимодействия:

$$\zeta_{уд} = \frac{\Delta N_{уд}}{N_{ст}}; \quad (2.30)$$

## 2.4 Расчет ударной составляющей потерь располагаемой энергии на примере ступени турбины К–1000–60/3000

В качестве объекта исследования была принята предпоследняя ступень турбины К-1000-60/3000, геометрические характеристики которой представлены в таблице 1. Выбран профиль сопловой решетки С–9015А, профиль рабочей Р–3021А.

Таблица 1– Геометрические характеристики ступени

Наименование	Значение
Средний диаметр ступени $d_{cp}$ , мм;	2850
Хорда профиля сопловой решетки $b_c$ , мм;	186,7
Хорда профиля рабочей решетки $b_p$ , мм;	90
Шаг сопловой решетки $t$ , мм	37,8
Шаг рабочей решетки $t$ , мм	26
Высота сопла $L_c$ , мм	1336
Высота рабочей лопатки $L_p$ , мм	1383
Осевой зазор $S$ , мм	48



**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4А	Вальков Георгий Павлович

Институт	ЭНИН	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<p>1. <i>Стоимость затрат технического проекта (ТП): на специальное оборудование, зарплаты, страховые отчисления, прочие и накладные расходы</i></p>	<p>Затраты на специальное оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам или по договорной цене. Заработная плата рассчитывается исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ Прочие и накладные расходы определяются исходя из суммы остальных статей расходов.</p>
<p>2. <i>Продолжительность выполнения ТП</i></p>	<p>Приблизительная оценка продолжительности выполнения ТП составляет 150 календарных дней</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p>1. <i>Оценка экономической эффективности технического проекта</i></p>	<p>FAST-анализ проекта.</p>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Наталия Геннадьевна	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4А	Вальков Георгий Павлович		

## **2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Существует множество факторов, определяющих перспективность научного исследования. Одним из таких факторов является коммерческая ценность разработки.

Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно знать для анализа перспектив проводимых научных исследований.

Таким образом, целью данного раздела является технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы (НИР), определение его перспективности и научно-технической результативности, определение и анализ трудовых и денежных затрат.

При создании комплекса использовались среда программирования Turbo Pascal. На основе НИР оформлена диссертационная работа в пакете программ Microsoft Office.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи :

- организация работ по НИР;
- определение этапов работы;
- определение трудоемкости работы;
- расчет нарастания технической готовности работ;
- составление план-графика, сметы затрат;
- FAST-анализ проекта;
- оценка экономической эффективности НИР.

## 2.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ. Залогом успешной реализации любого проекта является оптимальное планирование занятости каждого из его участников и сроков проведения отдельных работ на этапе организации процесса.

На данном этапе были установлены полный перечень проводимых работ, их исполнителей и оптимальная продолжительность. Научным руководителем (НР) проекта является Беляев Леонид Александрович. Руководитель выполняет координацию деятельности участников проекта, производит опытно-конструкторскую работу. Исполнителем (И) является Вальков Георгий Павлович. Исполнитель производит поиск и представление информации, проводит экспериментальные измерения по теме проекта. А также выполняет необходимые задания и указания руководителя.

Для оптимального распределения рабочих ресурсов и уменьшения затрат проведём планирование работы. Для определения ожидаемой продолжительности магистерской диссертации используем вероятностный метод, так как обычно не имеется нормативных данных о выполнении работ по научно-исследовательским темам. Всю работу мы делим на этапы, состоящие из отдельных работ. Каждая, из перечисленных ниже работ имеет свою продолжительность. Экспериментальным способом устанавливаем минимальную и максимальную продолжительность работ.

Составим перечень работ, которые необходимо произвести для достижения цели в поставленной задаче (таблица 2).

Таблица 2– Перечень работ и оценка времени их выполнения

Наименование работы	Исполнители	Продолжительность этапов/ день
1. Разработка и утверждения технического задания на диссертацию	НР 15 разряда	2
2. Ознакомления с заданием на проект	Инженер 10 разряда	2
3. Подбор и изучение технической литературы по теме диссертации	Инженер 10 разряда	30
4. Разработка календарного плана	НР 15 разряда	2
5. Планирование пунктов и подпунктов диссертации	Инженер 10 разряда НР 15 разряда	20/5
6. Разработка общего алгоритма программного комплекса	Инженер 10 разряда НР 15 разряда	30/3
7. Реализация алгоритма в среде программирования	Инженер 10 разряда НР15 разряда	25/3
8. Отладка полученного программного комплекса	Инженер 10 разряда НР15 разряда	15/2
9. Оформление отчета и составление выводов о проделанной работе	Инженер 10 разряда	30
10. Разработка презентационной части отчета по ВКР	Инженер 10 разряда	5
11. Итого	$\Sigma$	157/17

## 2.2 Смета затрат на проект

В состав затрат на создание проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. При планировании бюджета необходимо провести полную оценку всех расходов, необходимых для ее выполнения. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- работы, выполняемые сторонними организациями;
- прочие расходы.

Суммарные затраты на разработку темы или договорная цена на выполнение работы будет рассчитываться по формуле:

$$K_{\text{пр}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{со}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}}, \text{ руб.} \quad (4. 1)$$

где  $I_{\text{мат}}$  – материальные затраты;

$I_{\text{ам}}$  – амортизация компьютерной техники;

$I_{\text{зп}}$  – заработная плата сотрудников;

$I_{\text{со}}$  – социальные отчисления;

$I_{\text{пр}}$  – прочие затраты;

$I_{\text{накл}}$  – накладные расходы;

А) Материалы и покупные изделия

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. В эту статью расходов включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Таблица 3 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
1. Блокнот	2 шт.	40	80
2. Бумага для принтера формата А4	1 уп.	200	200
3. Ручка шариковая	2 шт.	10	20
4. Карандаш	2 шт.	10	20
5. Картридж	1 шт.	500	500
Всего			820

а) Амортизация компьютерной техники вычисляется по следующей формуле:

$$KT = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot C_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}} = \frac{339}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{7} = 3317 \text{ руб} / \text{год};$$

где  $T_{исп}$ -время использования компьютерной техники. Принимается равным 339 ч;

$T_{кал}$ =365 дней- количество дней в году;

$C_{кт}$ - стоимость компьютер компьютерной техники, принимаем 25000 рублей;

$T_{сл}$ =7 лет- срок службы компьютерной техники.

б) Заработная плата сотрудников:

$$\text{Инженер: } I_{\text{зн}}^{\text{мес}} = ЗП_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 20725 \text{ рублей};$$

$$\begin{aligned} \text{Научный работник: } I_{\text{зн}}^{\text{мес}} &= (ЗП_0 \cdot K_1 + Д) \cdot K_2 = \\ &= (23300 \cdot 1,1 + 2200) \cdot 1,3 = 36179 \text{ рублей}; \end{aligned}$$

$K_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск = 1,1 (10%);

$K_2$  – районный коэффициент = 1,3 (30%);

Д = 2200 рублей- доплата за интенсивность труда доцента;

$ЗП_0$  – месячный оклад :

-инженера=14500 руб;

-старший преподаватель 15 разряд=23300, рублей ;

Для инженера:

$$I_{\text{зн.инж}}^{\text{ф}} = \frac{I_{\text{зн}}^{\text{мес}}}{21} \cdot n = \frac{20725}{21} \cdot 157 = 154944 \text{ рублей};$$

где n- количество отработавших дней по факту;

Для старшего преподавателя 15 разряда:

$$I_{\text{зн.пр}}^{\text{ф}} = \frac{I_{\text{зн}}^{\text{мес}}}{21} \cdot n = \frac{36179}{21} \cdot 17 = 29288 \text{ рублей};$$

$$\text{ФЗП} = I_{\text{зн.инж}}^{\text{ф}} + I_{\text{зн.пр}}^{\text{ф}} = 154944 + 29288 = 184232 \text{ рублей.}$$

в) Социальные отчисления:

$$I_{\text{со}} = 30\% \cdot \text{ФЗП} = 30\% \cdot 184232 = 55269 \text{ рублей.}$$

г) Прочие затраты:

$$\begin{aligned} I_{\text{пр}} &= 10\% \cdot (I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{зн}} + I_{\text{со}}) = \\ &= 10\% \cdot (820 + 3317 + 184232 + 55269,6) = 24363 \text{ рубля}; \end{aligned}$$

д) Накладные расходы:

$$I_{\text{накл}} = 200\% \cdot \text{ФЗП} = 200\% \cdot 184232 = 368464 \text{ рубля};$$

Все данные сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Затраты на разработку магистерской диссертации

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	820
Амортизационные затраты на компьютерную технику	3317
Заработная плата сотрудников	184232
Социальные отчисления	55269
Прочие затраты	24363
Накладные расходы	368464
Итого	636465



## 2.3 Оценка экономической эффективности

### FAST-анализ проекта

FAST-анализ проведен в качестве оценки эффективности проекта. Он выступает как синоним функционально-стоимостного анализа. Суть этого метода основана на том, что затраты, связанные с использованием и созданием любого объекта, который выполняет заданные функции, состоят из обязательных для его эксплуатации и изготовления и дополнительных излишних затрат, которые возникают по причине введения излишних функций, не имеющих прямого отношения к предназначению объекта, или связаны с недоработкой конструкции, применяемых материалов, технологических процессов, методов организации труда и т.д. [12].

Первоначально обозначим объект FAST-анализа. В рамках данной работы производилось создание программного комплекса для определения величины потерь от ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками. Этот программный комплекс подлежит FAST-анализу.

Опишем основную и вспомогательную функции, выполняемых объектом. В рамках данной стадии FAST-анализа объект анализируется с позиции функционального устройства. Главная функция определяет назначение, сущность и главную цель создания объекта в целом. Основные функции обеспечивают принцип работы объекта и создают нужные условия для выполнения главной функции. Реализации основных функций способствуют вспомогательные функции. Функции программного комплекса приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Классификация функций программного комплекса

Наименование детали (узла, процесса)	Выполняемая функция	Главная	Основная	Вспомогательная
1. Определение начального вектора скорости влаги	Для заданных условий процесса определяет начальную скорость влаги			
2. Определение конечного вектора скорости влаги	Для заданных условий процесса определяет конечную скорость влаги			
3. Определение режима течения	Выводит значение числа Рейнольдса для воздуха, по которому можно определить режим течения жидкости			
4. Определение свойств влаги	Определяет теплофизические свойства влаги при заданных давлении и температуре			
5. Определение свойств воздуха	Определяет теплофизические свойства воздуха при средней температуре воздуха			

Определим значимости выполняемых программным комплексом функций. Для оценки значимости функций используется метод расстановки приоритетов, предложенный Блумбергом В.А. и Глущенко В.Ф. Первоначально строим матрицу смежности функций программного комплекса из условия что знак « $\Rightarrow$ » означает одинаковые функции по значимости; « $\langle \rangle$ » – менее значимая; « $\langle \rangle \rangle$ » – более значимая.

Матрица смежности функций программного комплекса представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Матрица смежности функций программного комплекса

№ функции	1	2	3	4	5
1	=	>	>	>	>
2	<	=	>	>	>
3	<	<	=	>	>
4	<	<	<	=	>
5	<	<	<	<	=

Примечание: Номера функций взяты по таблице 5

Преобразуем матрицу смежности в матрицу количественных соотношений функций программного комплекса (таблица 4) при условии замены знака «<» на 0,5; знака «>» на 1,5; знака «=» на 1.

Определим значимость функций  $Z_n$  путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям [12]:

$$Z_n = \frac{\sum_i i}{\Sigma}, \quad (4.2)$$

где  $\Sigma_i$  – суммарный бал по каждой функции (таблица 7);

$\Sigma$  – общая сумма баллов по всем функциям.

Таблица 7 – Матрица количественных соотношений функций программного комплекса [14]

№ функции	1	2	3	4	5	Итого
1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	7
2	0,5	1	1,5	1,5	1,5	6
3	0,5	0,5	1	1,5	1,5	5
4	0,5	0,5	0,5	1	1,5	4
5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	3
$\Sigma$						25

Сведем значимости функций программного комплекса в таблицу 8.

Таблица 8 – Значимости функций программного комплекса [14]

№ функции	Наименование функции	$\Sigma_i$	Зн
1	Определение начального вектора скорости влаги	7	0,28
2	Определение конечного вектора скорости влаги	6	0,24
3	Определение режима течения	5	0,20
4	Определение свойств влаги	4	0,16
5	Определение свойств воздуха	3	0,12
	$\Sigma$	25	1,00

Заключительным этапом FAST-анализа является анализ стоимости функций, выполняемых программным комплексом. Для этого рассчитаем себестоимость каждой из функций программного комплекса. Так как функции программного комплекса пишутся инженером, то себестоимость  $i$ -функции определяется:

$$Cб = T_i \cdot \frac{C}{\Sigma T_i}; \quad (4.3)$$

где  $T_i$  – трудоемкость создания функции, час.

$C$  – затраты на НИР, из таблицы 3  $C=636465$  руб.;

$\Sigma T_i$  – суммарная трудоемкость создания функций.

Сведем анализ стоимости функций, выполняемых программным комплексом в таблицу 9.

Таблица 9 – Анализ стоимости функций, выполняемых программным комплексом

№ функции	Наименование функции	$T_i$ час	Сб, руб
1	Определение конечной температуры газа	18	216158
2	Определение конечной температуры воздуха	17	204150
3	Определение режима течения газа	10	120088
4	Определение свойств газа	4	48035
5	Определение свойств воздуха	4	48035
$\Sigma$		53	636465

На основе данных таблиц 8 и 9 построим функционально-стоимостную диаграмму программного комплекса, представленную на рисунке 14.

Как видно из рисунка 16, главные и основные функции программного комплекса (№1-3) имеют большую значимость для проекта и составляют примерно 85% себестоимости программного комплекса. Оставшиеся вспомогательные функции программного комплекса не требуют больших вложений и повышают информативность программного комплекса.

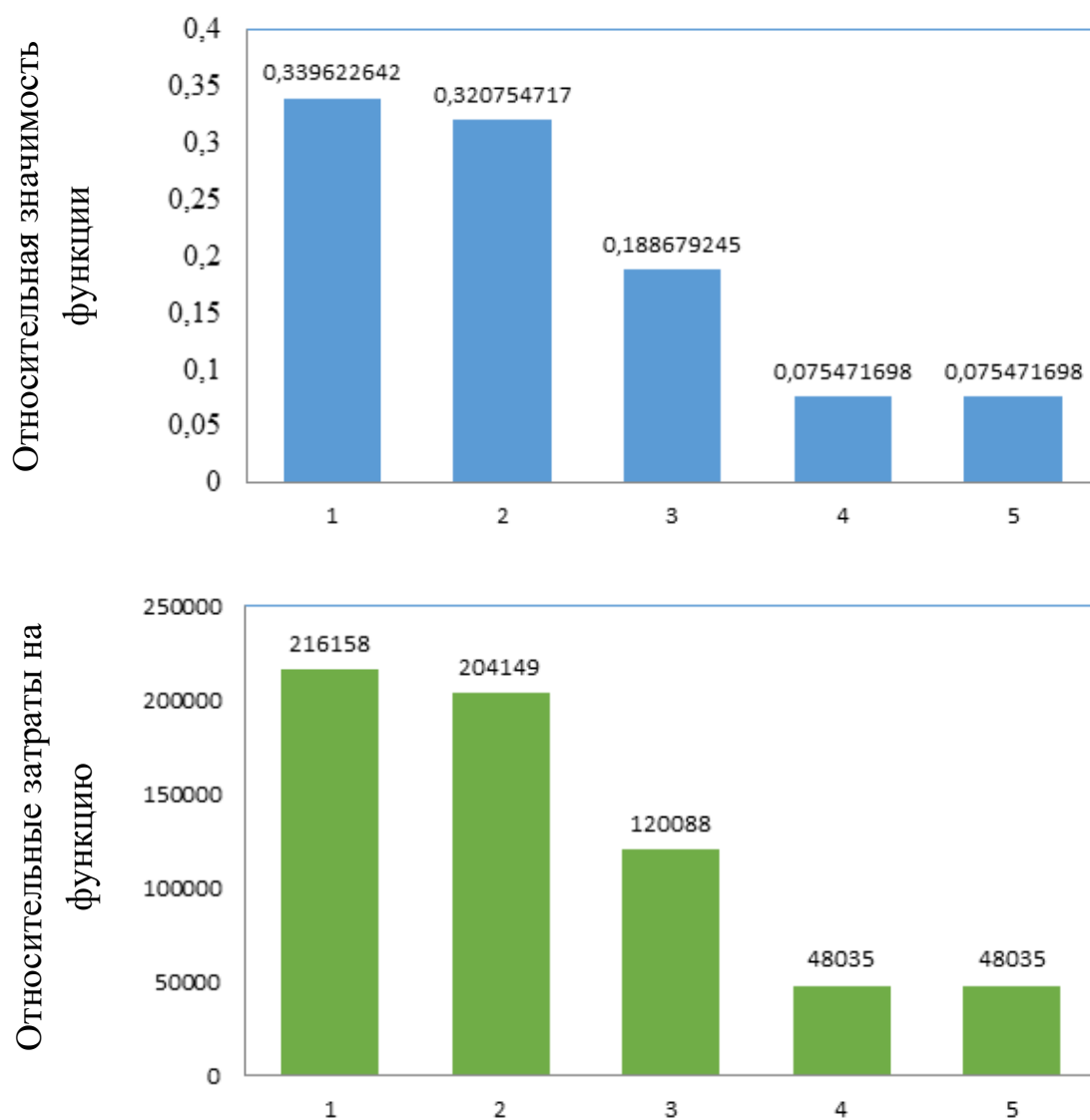


Рисунок 16 – Функционально-стоимостная диаграмма программного комплекса

#### 4.4 Выводы по главе

В данной части работы рассмотрен FAST-анализ программного комплекса, определены этапы и трудоемкость работ, составлена смета затрат, произведен расчет нарастания технической готовности программного комплекса и осуществлено технико-экономическое обоснование НИР.

FAST-анализ показал значимость программного комплекса, использование которого в будущем, позволит определить величину потерь от ударного взаимодействия частиц влаги с рабочими лопатками в турбинных

ступенях. Это позволит уменьшить потери от влажности, а так же более точно понять механизм ударного взаимодействия влаги с последними ступенями влажнопаровых турбин.