



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Хемати Масуд

**Совершенствование систем сепарации влаги во
влажнопаровых турбинах**

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

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

Научный руководитель:

Забелин Николай Алексеевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Богов Игорь Александрович
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры судовых турбин и турбинных установок,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный морской технический университет»,
г. Санкт-Петербург

Аронсон Константин Эрленович
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры «Турбины и двигатели» Федерального
государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург

Ведущая организация:

Акционерное общество «Силловые машины – ЗТЛ, ЛМЗ,
Электросила, Энергомашэкспорт» (АО «Силловые
машины»), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «12» ноября 2024 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.7.36 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Барсков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Повышение эффективности и надежности лопаток влажно-паровых отсеков и ступеней турбин АЭС и ТЭС зависит от уровня влажности в проточной части. Внешние сепараторы использовались для турбин АЭС. В последние годы используются различные сепараторы, которые размещаются в проточной части турбины. Данные сепараторы позволяют удалить большую часть эрозионоопасной влаги паровой турбины, поскольку крупные капли являются основной причиной эрозии проточной части паровой турбины. Однако одной из основных проблем при использовании этих сепараторов являются аэродинамические потери, что снижает КПД турбоустановки. В последние годы большой расчет сделан на то, чтобы были созданы правильные условия, при которых использование этих систем при наименьших аэродинамических потерях позволит удалить наибольшее количество влаги в проточной части турбин.

Одним из новых и полезных методов сепарации влаги в паровых турбинах является применение влагоулавливающих устройств в зазоре между рабочими и сопловыми аппаратами. Эта система размещена на периферии ступени и поверхность этой системы сепарации выполняется микро-рельефной, потому что на такой поверхности осаждается больше влаги.

Степень разработанности темы диссертации

В данной работе исследуется снижение эрозии сопловых лопаток с помощью сепаратора, монтированного последних ступенях паровой турбины. Эту рельефную поверхность можно также использовать для увеличения осаждения на периферийные поверхности в зазоре между сопловым аппаратом (СА) и рабочим колесом (РК).

Цель работы

Целью данной работы является проведение расчетных исследований течения влаги в потоке пара между каналами сопла и взаимодействия влаги на рельефной поверхности сопла. Кроме того, осаждение и эрозию на гладкой поверхности сопла сравнивают с рельефной поверхностью и доказывают, что рельефная поверхность имеет меньшую эрозию и большее осаждение. Также определяется лучший угол при вершине канавки рельефной поверхности для максимального осаждения после взаимодействия влаги. В данной работе проверялось, какой угол должны иметь канавки, чтобы лопатки сопла имела наименьшую эрозию. Также было проверено, что если канавки расположены по направлению потока пара, они будут иметь наименьшую эрозию и наибольшее осаждение влаги. В итоге канавки располагались в направлениях, перпендикулярных и параллельных потоку пара между двумя сопловыми лопатками, и в этих двух случаях исследовалось влияние треугольной канавки с разными углами на осаждение и эрозию.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи

- Моделирование движения влаги в потоке пара, взаимодействия влаги с рельефной поверхностью лопаток сопел, а также гладкой поверхностью
- Моделирование осаждения влаги на рельефной и гладкой поверхностью после взаимодействия
- Исследование влияния геометрии и направления канавок на движение, осаждение и эрозия капельной влаги в межлопаточных каналах сопловой решетки
- Поиск оптимального угла канавки для максимального осаждения влаги и минимальной эрозии после взаимодействия влаги на лопаток сопел в проточной части
- Проектирование сепаратора с оптимальной глубиной и оптимальным углом канавок , при этом канавки установлены в вертикальном направлении движения пара на поверхности лопатки

Научная новизна работы

1. Получены результаты анализа ранее выполненных экспериментов по движению влаги в двухфазном потоке, образованию пленки на поверхность в результате взаимодействия капель на поверхность и их осаждение, движению пленки на поверхность и её дроблению в двухфазном потоке.

2. Получены результаты анализа ранее выполненных экспериментов взаимодействие капель на микро-рельефную поверхность и количество их осаждения.

3. Используя результаты описанных выше экспериментов по взаимодействию капель диаметрами 0-250 мкм на гладкую поверхность и микро-рельефную поверхность, создана численная модель, которая моделирует движение крупных капель диаметрами 0-120 мкм в канале сопла последней ступени турбины С-9015А, взаимодействие капель на поверхности лопатки сопла с канавками в диапазоне углов наклона β от 30 до 120 мкм глубиной от 1,5 до 4,5 мм при перепаде температур $\Delta T = 7,5^\circ$ на последней ступени турбины, движение вторичных капель после взаимодействия первичных капель с лопаткой, осаждение капель на поверхности лопатки с канавками в диапазоне углов наклона β от 5 до 60 мкм глубиной от 1,5 до 4,5 мм при перепаде температур $\Delta T = 7,5$. Сепаратор влаги расположен на периферии турбины за сопловой лопаткой в зазоре между лопатками ротора и соплом. Этот сепаратор имеет микро-рельефную поверхность. Также создана численная модель, которая моделирует взаимодействие вторичных и первичных капель, выходящих из канала сопла, с гладкой поверхностью и их осаждение. Определена геометрия канавок микро-рельефной поверхности, обеспечивающая минимальное эрозионное воздействие парокapельного потока.

4. Определена геометрия канавок микро-рельефной поверхности, обеспечивающая минимальное эрозионное воздействие парокapельного потока.

Теоретическая и практическая значимость работы

В расчетах этой работы даны рекомендации по созданию условий, при которых эффективность сепарации достигает своего наивысшего значения. Рекомендации будут использованы при проектировании современных ступеней мощных турбин ТЭС и АЭС с любой длиной лопатки.

Практическая значимость работы

В результате исследования сформулированы рекомендации по первичному проектированию сопел последних ступеней с микро-рельефными поверхностями. Также были представлены математические модели конструкции и направления канавок для повышения эффективности. Эта информация может быть использована в практике проектирования.

Методология и методы исследования

Построена расчетная модель движения и осаждения капельной влаги на гладкие и микро-рельефные поверхности. Язык программирования Фортран использовался для численных расчетов математических моделей движения и взаимодействия влаги с плоскими и рельефными поверхностями. Математические модели верифицированы на основе экспериментальных работ, ссылки на эти экспериментальные работы приведены в ссылках на диссертацию.

Основные положения, выносимые на защиту

результат снижения эрозии лопаток сопел с рельефной поверхностью с помощью экспериментальных результатов взаимодействия влаги на плоскую поверхность, математических моделей движения влаги и их взаимодействия на рельефную поверхность и плоскую поверхность сопла, рекомендации по проектированию сопел с рельефной поверхностью для уменьшения эрозии и увеличения осаждения.

Степень достоверности результатов

Для расчетов использовался язык программирования Фортран. В данной работе также использовались программы Origin и Thermophys. Использованные вычислительные модели были проведены ранее и подтверждены по результатам экспериментальных испытаний других работ. Были представлены модели движения влаги и взаимодействия влаги на различные поверхности и выявлено, что если использовать рельефную поверхность с канавками, превышающими диаметр капель, то будет уменьшаться как эрозия поверхности, так и повышаться осаждение на этой поверхности. Были изучены результаты взаимодействия влаги на рельефную поверхность сопла при различных углах и представлен наиболее подходящий угол канавки для минимальной поверхностной эрозии и максимального осаждения на поверхности.

Личный вклад заключается

- При исследовании численных расчетов исследовалось влияние различных углов канавок (канавок на поверхности сопла) на снижение эрозии сопла С-9015А.
- При исследовании численных расчетов исследовалось влияние различных углов канавок на увеличение сепарации влаги.
- При исследовании численных расчетов исследовалось влияние глубины канавок на снижение эрозии.
- Даны рекомендации по использованию наиболее подходящих канавок на поверхности сопел турбины для уменьшения эрозии сопла после взаимодействия влаги с поверхностью и увеличения осаждения влаги и, как следствие, сепарации влаги.

Апробация работы

Основные результаты настоящей работы докладывались на следующих научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах:

1. 2-я международная конференция «Asia Power and Electrical Technology Conference», г. Шанхай, Китай, 2023 г.
2. 3-я международная конференция «Innovations in Energy Management and Renewable Resources», Институт инженерии и менеджмента, Калкате, Индия, 2023 г.
3. 10-я международная конференция «Energy Engineering and Environmental Engineering», Институт инженерии и менеджмента, Калкате, Индия, 2023 г.
4. 11-я международная конференция «Creative Technology», Технологический университет Раджамангала Крунгтеп (RMUTK), Бангкок, Таиланд, 2023 г.
5. Первая международная конференция «Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия, 2023 г.
6. 2-я международная конференция «Research in Europe», Тегеранский университет, Тегеран, Иран, 2023 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 в издании, входящем в перечень ВАК, и 5 в изданиях, индексируемых в базах Scopus, Web of Science и международных базах. Материалы работ отображены достаточно полно.

Содержание и структура работы

Структура диссертации представлена четырьмя главами, заключением, списком литературы (73 наименований), списком сокращений и условных обозначений. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, из них 119 страницы – основной текст. В работе размещено 8 таблиц и 95 рисунок.

Содержание работы

В главе 1 описываются результаты экспериментальных и теоретических работ, выполненных ранее в отношении эрозии лопаток, конденсации, роста и распада капель, дробление капель, движения жидкой фазы и аэродинамического коэффициента капель в потоке. Обзор более 20 публикаций на английском языке про характер и особенности движения капли в двухфазном потоке дал следующие результаты для эрозии лопаток, конденсации, роста и движения капли в потоке. Например, для расчета коэффициент сопротивления как предложены такие формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_D = \frac{A_i}{Re^{n_i}}; (i = 1,2,3) \\ A_1 = 24; n_1 = 1; Re \leq 1 \\ A_2 = 24; n_2 = \frac{3}{5}; 1 < Re < 10^3 \\ A_3 = 0,44; n_3 = 0; Re \geq 10^3 \end{array} \right. \quad (1)$$

Основной причиной эрозии лопатки ротора в турбинах являются крупные капли, концентрация которых из-за скорости окружающей среды и центробежной силы выше на периферии проточной части паровых турбин, и поэтому большая часть эрозии обычно происходит в зоне более 70% от высоты лопаток.

Траектории движения капель в канале сопла зависят от их размера. Капли диаметром менее 1-5 мкм в потоке практически следуют линиям тока паровой фазы. Капли размером больше этого диапазона (5-50 мкм) движутся с небольшим отклонением от линий тока потока пара. В этом диапазоне диаметра чем больше диаметр капли, тем больше отклонение. Гораздо более крупные капли диаметром 50 – 300 мкм движутся, почти не отклоняясь под действием парового потока, что обусловлено большой разностью в плотности паровой и жидкой фазы.

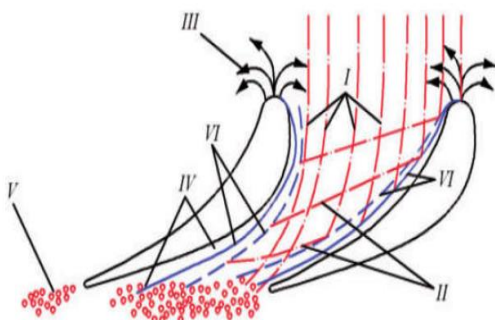


Рисунок 1 - Движение влаги между направляющими лопатками

I – Поток первичной влаги которые без взаимодействия переходят между направляющими лопатками; II – Капли, отраженные вогнутой поверхностью, выбитые первичными каплями или сорванные с пленки на вогнутой поверхности паровым потоком; III – Капли, отраженные входной кромкой, сорванные и выбитые из пленки на входном участке профиля; IV – Капли, образовавшиеся из пленки на конфузормом и диффузормом участках спинки в косом срезе; V – Капли, образовавшиеся при дроблении пленки, стекающей с выходных кромок лопаток; VI – Паро-капельный пограничный слой над пленками.

В этой главе также указано, что описание механизма распада капли и образования большого количества компонентов разделено на 5 типов в соответствии с диапазоном чисел Вебера, который выглядит следующим образом: вибрационный распад ($We \leq 12$), распад в виде венца ($12 \leq We \leq 50$), распад в виде венца с ядром ($50 \leq We \leq 100$), распад в виде листа ($100 \leq We \leq 350$) и катастрофический распад ($We \geq 350$). Основной причиной эрозии лопатки ротора в турбинах являются крупные капли, концентрация которых из-за скорости окружающей среды и центробежной силы выше на периферии проточной части паровых турбин, и поэтому большая часть эрозии обычно происходит в зоне более 70% от высоты лопаток.

В главе 2 описывается различные сепараторы внутри и вне паровой турбины. Циклонный сепаратор один из внешних сепараторов в общем объясняется и также описывается все различные типы сеперации влаги внутри турбины, которые были выполнены ранее в проточной части. В этой главе также рассказывается о силах, действующих на каплю в потоке пара, взаимодействии капли с различными поверхностями, а также о осаждении капель после соударения и движении пленки жидкости на поверхности на основе разных работ. Уравнение движения капель может быть записано в виде:

$$m_k \cdot \frac{dc_k}{dt} = F_{Tp} + F_p + F_{k.m} + F_g \quad (3)$$

Где c_k – скорость капли; m_k – масса капли; F_p – сила давления; F_{Tp} – сила трения; $F_{k.m}$ – сила, вызванная ускорением несущей среды, влекомой каплей; F_g – сила, которая учитывает гравитационное влияние и наличие неинерционного воздействия, такого как вращение.

Режим соударения определяется характеристиками поверхности стены, такими как смоченное/сухое состояние, толщина пленки жидкости, шероховатость поверхности и так далее. Как показано на Рисунке 2 различные работы определяли семь различных режимов соударения одной капли со смоченной/сухой и шероховатой/гладкой стенкой с точки зрения числа Вебера и температуры поверхности, а именно: прилипание, откат, растекание, всплеск, распада и откат с распадой.

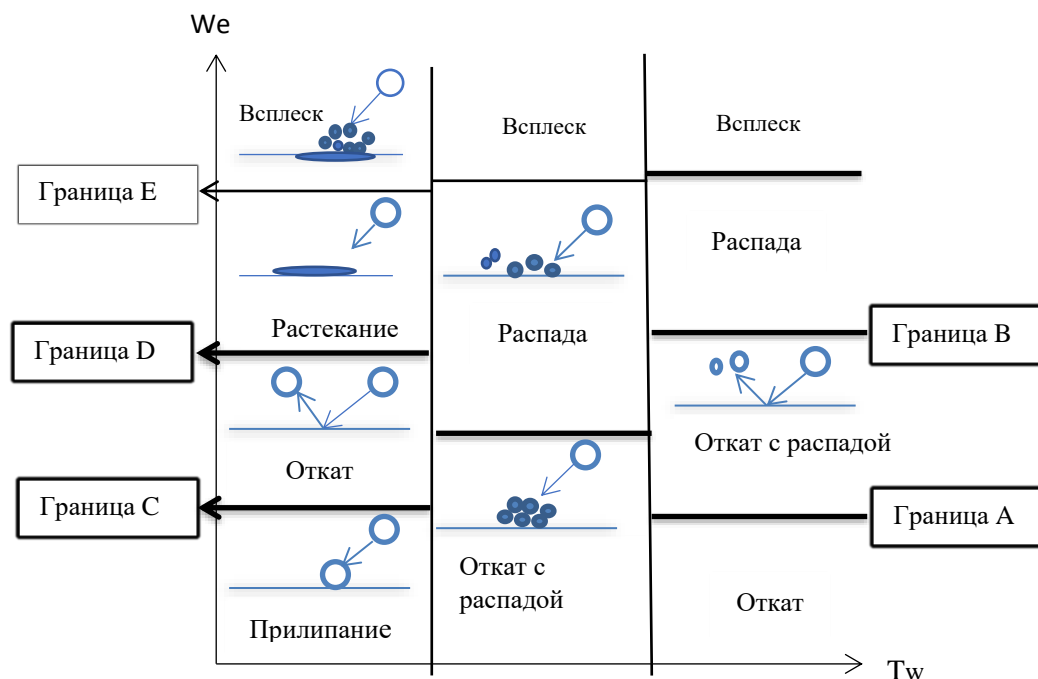


Рисунок 2 - Границы различных событий при взаимодействии капли с плоской поверхностью по числовой диаграмме Вебера и температуре стенки

Для определения границей режимов взаимодействия капли на поверхность (А, В, С, D и E) были выполнены различные задачи. Одним из наиболее эффективных методов сепарации является применение системы влагоудаления на периферии проточной части в зазоре между направляющими лопатками и рабочими лопатками. Поверхность этого сепаратора на периферии проточной части представляет собой микрорельефную поверхность (См. Рисунок 3).

В работе, выполненной в этой диссертации, рельефная поверхность была размещена на поверхности сопла, чтобы уменьшить эрозию лопаток сопла и повысить осаждение для сепарации. Поскольку поверхность сепаратора, расположенная на лопатки, является микро-рельефной поверхностью, взаимодействие капель диаметрами меньше ширины канавок на этой поверхности исследуется в различных работах. Капля которая взаимодействует с микро-рельефной поверхностью, может находиться в одном из следующих состояний: состояние Кэсси, Венцеля или промежуточное состояние. В случае состояния Кэсси ни один из промежутков между канавками не заполняется водой после соударения капли на микро-рельефную поверхность. В случае состояния Венцеля все промежутки между канавками заполняются водой после того, как капля взаимодействует на микро-рельефную поверхность. В случае промежуточного состояния некоторые из промежутков между канавками заполнена водой. Состояние Кэсси и состояние Венцеля после столкновения капли с микро-рельефной поверхностью показаны на Рисунке 4.

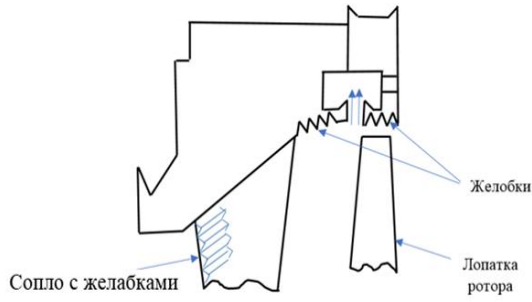


Рисунок 3 - Тип сепаратора с микро-рельефной поверхностью

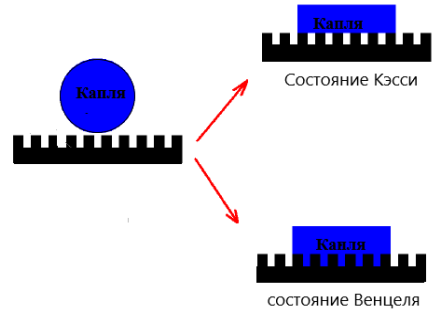


Рисунок 4 - Состояние Кэсси и состояние Венцеля после столкновения капли

В главе 3 движение крупнодисперсных капель, их взаимодействие с лопатками сопел и их осаждение на её лопотки моделируются, а также взаимодействие капель и их осаждение на микрорельефную поверхность, которая размещена на периферии и за направляющим лопатке турбины в проточной части моделируются. В этой работе рассматривается только аэродинамическая сила и уравнения записываются следующим образом:

$$\frac{d\vec{c}_k}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\mu_{п} \cdot C_x}{d_k^2 \cdot \rho_k} \cdot \overline{Re}_k \cdot (\vec{c}_{п} - \vec{c}_k) \tag{4}$$

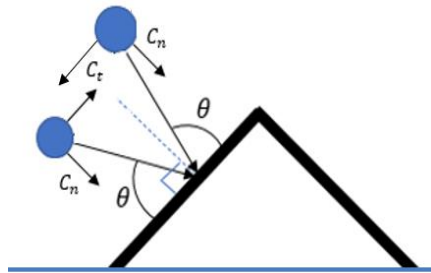


Рисунок 5 - Компоненты нормальной скорости и тангенциальной скорости относительно поверхности с

Энергия эрозии капли со скоростью С после соударения с рельефной поверхностью определяется уравнением 5, как показано на Рисунке 5.

$$E_n = \frac{1}{2} \cdot m_k \cdot C_n^2 = \frac{1}{2} \cdot m_k \cdot C^2 \cdot \sin^2 \theta \tag{5}$$

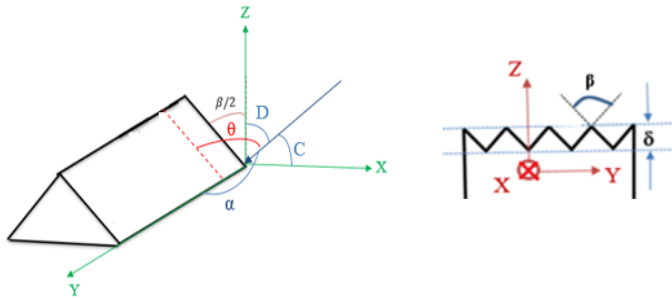


Рисунок 6 - C, alpha и D углы падения капли относительно осей координат X, Y, Z и угол

Угол (theta) в декартовых координатах может быть получен через углы падения капли относительно осей x, y и z, а также при вершине желобков, т. е. beta/2, как показано на Рисунке 6. Тогда если направление капли изменяется относительно осей Y и Z, но составляет с осью X постоянный угол 90° (C = 90°), то угол получается через углы и beta/2 по формуле (6).

$$\sin \theta = \sin \alpha \cdot \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \tag{6}$$

Когда направление капли меняется относительно осей X и Z, но составляет постоянный угол 90° с осью Y (alpha = 90), угол theta получается через углы C, D и beta/2 из формулы (7).

$$\sin \theta = \cos C \cdot \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \cos D \cdot \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \tag{7}$$

Столкновение капель с поверхностью может привести к четырем различным режимам. Капли могут оседать на поверхности в двух режимах и формировать пленку (режимы прилипания и растекания), капли могут отражаться (откат), а капли могут отскакивать с последующим разрушением на вторичные капли (всплеск). В этой работе предложено $C = We_{crit} \approx 2$ для границы прилипания-отката, поэтому режим прилипания считается в диапазоне $0 \leq We \leq 2$. Граница откат-растекание в зазоре между лопатками ротора и сопловыми лопатками считается $D = We_{crit} \approx 10$ согласно работе поэтому режим отката рассматривается в диапазоне $2 \leq We \leq 10$.

В данной работе при соударения капли о поверхность границы между режимом растекания для полного осаждения и режимом всплеска после соударения определяются значением $K = We_n \cdot Re_n = 57,7$. В этой работе рельефная поверхность размещена на поверхности лопатки сопла. Были исследованы две модели: 1 – Рельефная поверхность на поверхности сопловой лопатки в направлении потока пара и 2 – Рельефная поверхность на поверхности сопловой лопатки в направлении, перпендикулярном потоку пара (См. Рисунки 7 и 8).

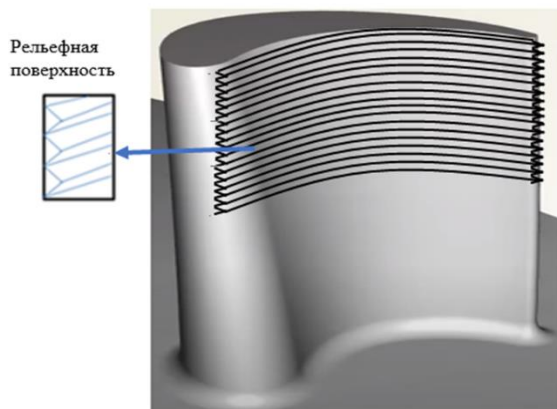


Рисунок 7 - Рельефная поверхность на поверхности сопла в направлении пара

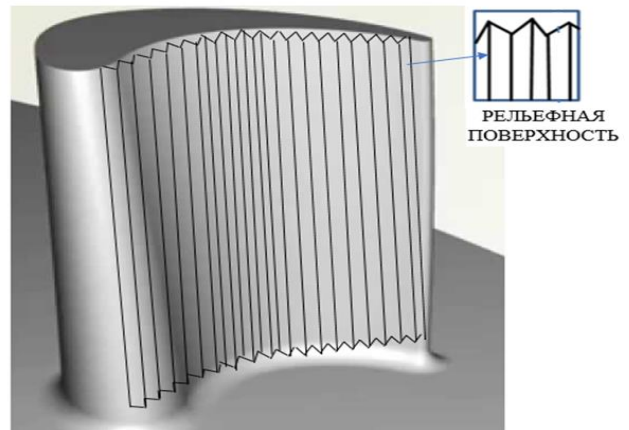


Рисунок 8 - Рельефная поверхность на поверхности сопла в направлении, перпендикулярном потоку пара

Для выполнения расчетов использовалась геометрия сопла С-9015А, показанная на Рисунке 9. Распределение спектра капель по диаметру на этой работе определяется с помощью диаграммы, как показано на Рисунке 10.

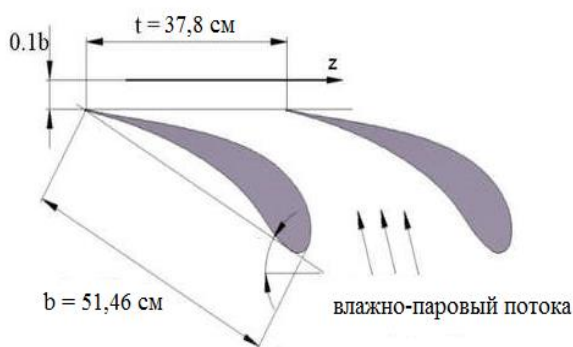


Рисунок 9 - геометрия сопла С-9015А

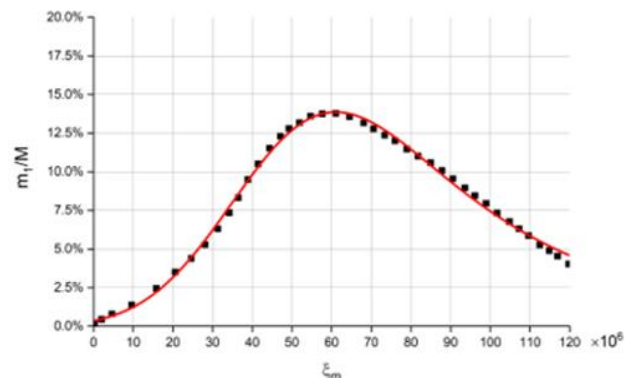


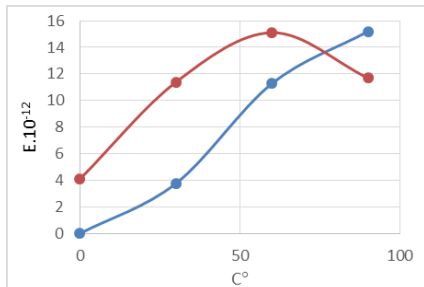
Рисунок 10 - Функция распределения капель по диаметру

Формула этой функции распределения капель определяется следующим уравнением.

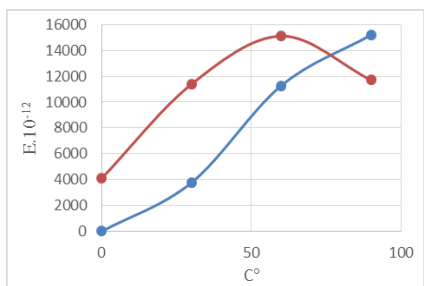
$$f(\xi) = 0,492 + 13,1 \cdot e^{(1 - \left(\frac{\xi - 60,64}{28,37}\right) - e^{-\left(\frac{\xi - 60,64}{28,37}\right))} \quad (8)$$

В главе 4 приведены результаты моделирования лопатки сопла и указан оптимальный угол канавки для максимального осаждения влаги и минимальной эрозии после взаимодействия влаги.

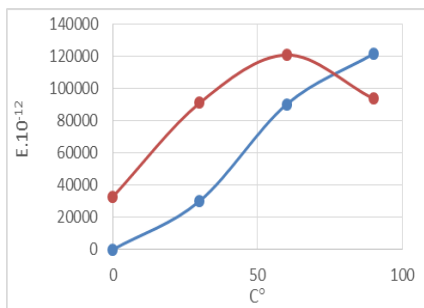
В результатах столкновения капле на микро-рельефной поверхности для энергии эрозии (См. Рисунок 11), полученных путем изменения угла C от нуля до 90 (при постоянном угле $\alpha=90$), было обнаружено, что:



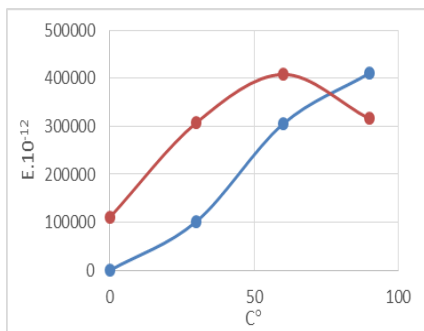
а)



б)



в)



г)

1- Если рельефной поверхность с канавками расположена на пути капле таким образом, что угол падения C равен углу наклона канавок $\beta/2$ (т. е. $C = \beta/2$), то максимальная эрозия происходит для рельефной поверхности, т. к. в этом случае эффективная энергия эрозии на рельефной поверхности канавки максимальна, как видно из графиков

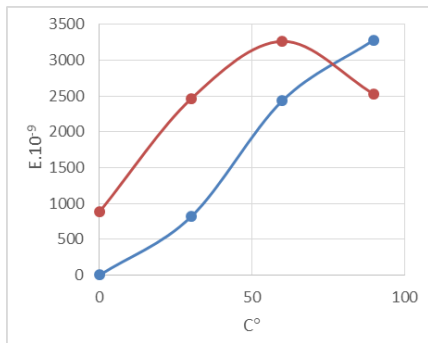
2- По сравнению с соударением капли о плоскую поверхность минимальная энергия эрозии возникает, когда капля попадает на рельефную поверхность перпендикулярно (т.е. $C = 90$).

3- Критический угол столкновения капле ($C = C_{crit}$), при котором энергия эрозии при столкновении на рельефной поверхности равна энергии эрозии при столкновении на плоской поверхности, с помощью угла наклона рельефной поверхности ($\frac{\beta}{2}$) определяется из следующего уравнения:

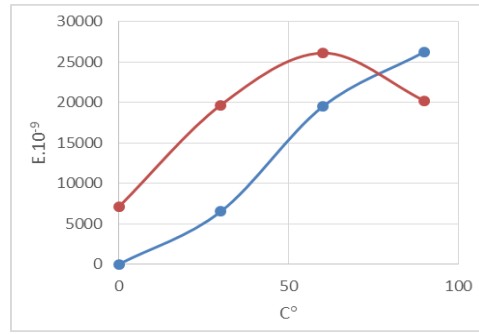
$$C_{crit} = -0,0000023146 \cdot \beta^4 + 0,0006635802 \cdot \beta^3 - 0,067361111 \cdot \beta^2 + 3,15278 \cdot \beta \quad (9)$$

4- Угол C для соударения капле (под постоянным углом $\alpha = 90$) должен быть больше угла C_{crit} чтобы энергия эрозии при соударения о рельефную поверхность была меньше энергии эрозии при соударения о плоскую поверхность. Этот угол равен 75 для угла наклона $\frac{\beta}{2} = 60$, для угла наклона $\frac{\beta}{2} = 45$ равен 70 , для угла наклона $\frac{\beta}{2} = 30$ равен 60 и для угла наклона $\frac{\beta}{2} = 15$ равен 50 .

5- Чем меньше угол наклона, тем меньше энергия эрозии соударения на рельефной поверхности. Но в этом случае бета не должна быть меньше предела, так как в этом случае капли будут попадать на острую кромку микроканавок, а энергия эрозии будет возрастать, так как эрозионная энергия соударения по острой кромке рельефной поверхности аналогична энергии соударения о плоскую поверхность.



д)



е)

Рисунок 11- Энергия эрозии для столкновения каплей разного диаметра на рельефную поверхность с углом наклона $\frac{\beta}{2} = 60^\circ$ — и на гладкую поверхность — а) $d = 1$ мкм, б) $d = 10$ мкм, в) $d = 20$ мкм, г) $d = 30$ мкм, д) $d = 60$ мкм и е) $d = 120$ мкм с разными углами C°

В результатах столкновения каплей на микро-рельефной поверхности для энергии эрозии (См. Рисунок 12), полученных путем изменения угла α от нуля до 90 (при $C = 90$), было обнаружено, что:

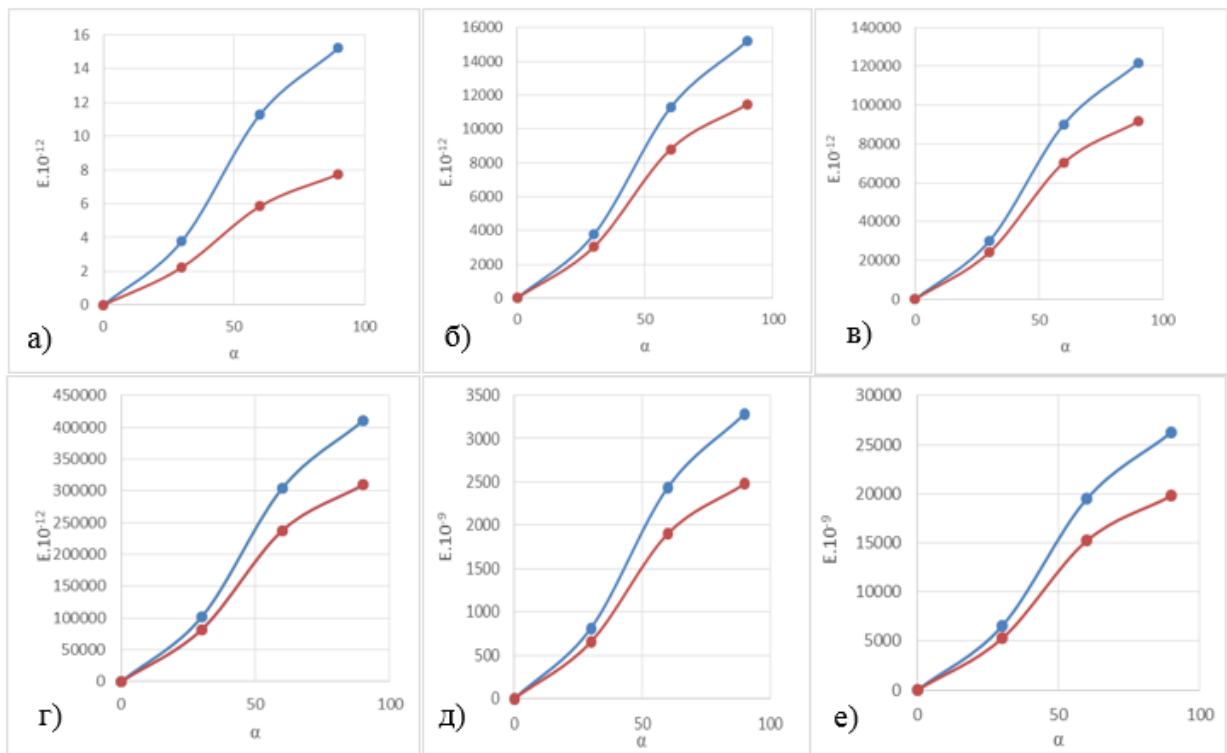


Рисунок 12- Энергия эрозии для столкновения каплей разного диаметра на рельефную поверхность с углом наклона $\frac{\beta}{2} = 60^\circ$ — и на гладкую поверхность — а) $d = 1$ мкм, б) $d = 10$ мкм, в) $d = 20$ мкм, г) $d = 30$ мкм, д) $d = 60$ мкм и е) $d = 120$ мкм с разными углами α°

- 1- Чем ближе угол α к девяноста градусам, тем больше энергия эрозии соударения капли о рельефную поверхность и о плоскую поверхность, но с увеличением угла α разница между энергия эрозии соударения о рельефную поверхность и энергия эрозии соударения о

плоскую поверхность увеличивается и, и эта разница достигает максимального значения при 90° .

- 2- При угле $\alpha = 90^\circ$, чем больше угол наклона $\frac{\beta}{2}$, тем больше энергия эрозии соударения капель на рельефной поверхности.
- 3- Чем меньше угол наклона, тем меньше энергия эрозии соударения на рельефной поверхности.

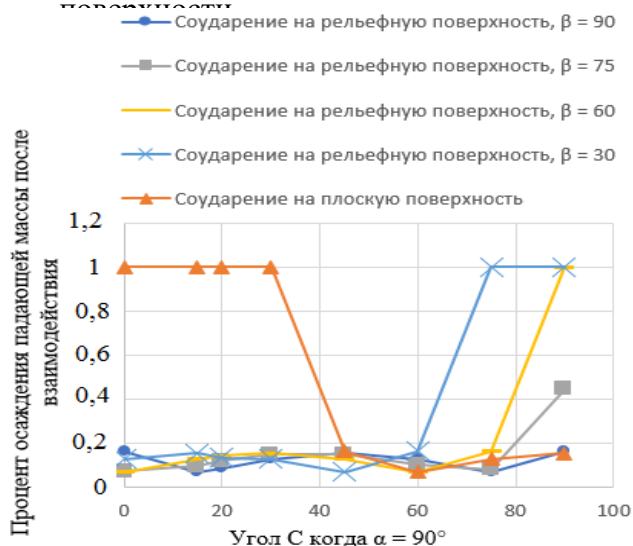


Рисунок 13 - Соударение капли диаметром 10 мкм под разными углами β и C , но $\alpha = 90^\circ$, на рельефную поверхность и плоскую поверхность

Осаждение получено при разных углах падения капли диаметром 10 мкм на плоскую поверхность и рельефную поверхность с разными углами наклона $\beta/2$, а также разными углами C . Результаты, представленные на рисунке 13, показывают, что для капли, падающей на плоскую поверхность со скоростью 240 м/с, если угол падения капли меньше 30° , вся капля будет осажаться на поверхности после соударения. При углах более 30° (см. Рисунок 13), после соударения происходит всплеск капли, и небольшой процент материала капли оседает на плоской поверхности но взаимодействие капли с рельефной поверхностью с разными углами C и разными углами канавки β и показывает, что если угол канавки β меньше 60° , а угол C составляет от 80 до 90° , то вся капля осажается на поверхности.

В Таблице 1 показаны результаты эффективного значения энергии эрозии при соударения спектра капель на гладкую и рельефную поверхность сопла

Таблица 1 - Сравнение эффективной эрозионной энергии спектра капель при соударения о гладкую поверхности сопла и рельефную поверхность при разных углах канавки

Расположение каплей на входе в сопло (x, см)	$E \cdot (10^{-6})$ о гладкую поверхность сопла	$E \cdot (10^{-6})$ о рельефную поверхность сопла $\beta = 150^\circ$	$E \cdot (10^{-6})$ о рельефную поверхность сопла $\beta = 120^\circ$	$E \cdot (10^{-6})$ о рельефную поверхность сопла $\beta = 90^\circ$	$E \cdot (10^{-6})$ о рельефную поверхность сопла $\beta = 60^\circ$
1 (-22 см)	0,910	0,893	0,718	0,479	0,239
2 (-20 см)	1,153	1,121	0,901	0,600	0,300
3 (-18 см)	1,358	1,315	1,057	0,705	0,352
4 (-16 см)	1,522	1,468	1,180	0,787	0,393
5 (-14 см)	1,643	1,575	1,266	0,844	0,422
6 (-12 см)	1,717	1,634	1,313	0,875	0,437
7 (-10 см)	1,746	1,641	1,319	0,879	0,439

Как показывают результаты Таблиц 1 эрозионной энергии спектра капель, во всех местах попадания капель эрозия поверхности, вызванная ударом капель, меньше, так как, согласно

результатам, эрозионная энергия удара по рельефная поверхность на всех входных расстояниях по сравнению с эрозионной энергией гладкой поверхности меньше.

Также результаты Таблицы показывают, что чем меньше угол канавки, тем меньше эрозионная энергия капель на поверхности, поскольку угол между соударением капель и поверхностью канавки также меньше (см. Рисунок 14).

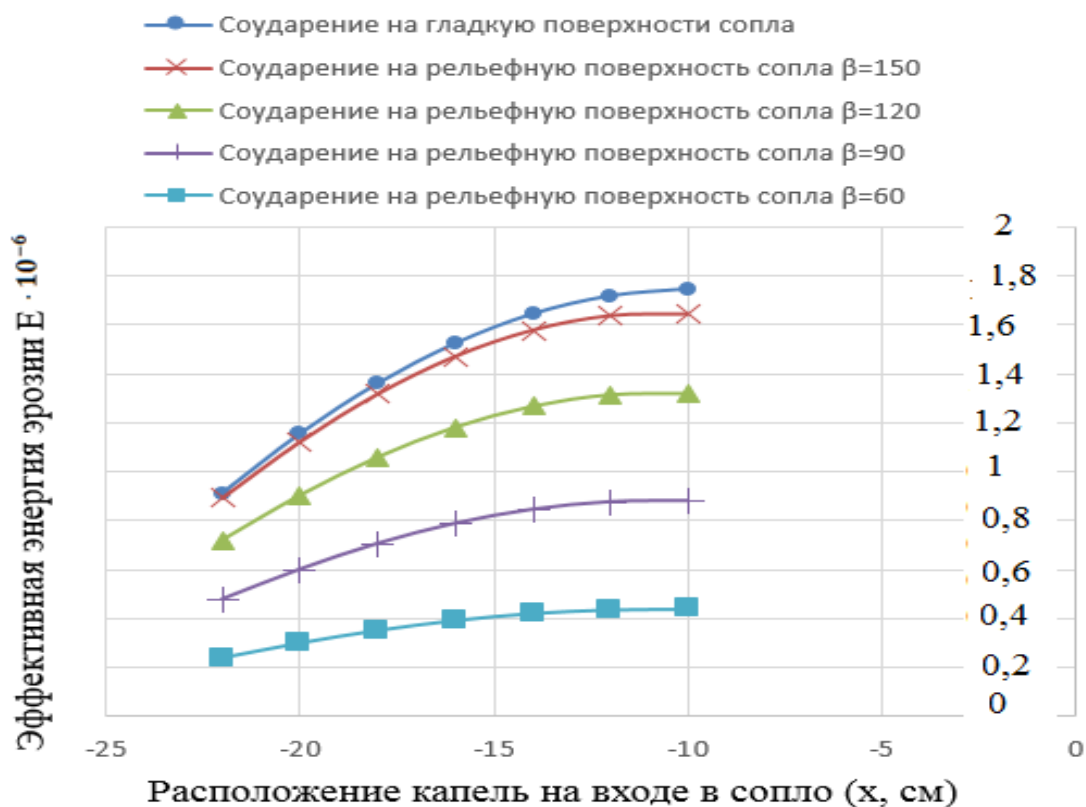


Рисунок 14 - Сравнение эффективной энергии эрозии ($E \cdot 10^{-6}$) спектра капель при соударения о гладкую поверхность сопла и рельефную поверхность при различных углах канавки

В Таблице 2 представлены результаты взаимодействия спектра капель на гладкую поверхность лопатки и рельефную поверхность лопатки с углами канавки 60° , 30° , 15° , 10° и 7° если этот спектр капель входит в сопло из разных мест входа в сопло и в направлении пара.

Как показывают результаты этой Таблицы, для всех входных расстояний до сопла, когда спектр капель воздействует на гладкую поверхность сопла, для всех капель на указанных расстояниях происходит всплеск, а на гладкой поверхности происходит незначительное осаждение. Но если один и тот же набор капель попадает на рельефную поверхность при тех же условиях, то тем меньше становится угол канавки и уменьшается процент всплеска капель после соударения.

Если угол канавки становится меньше 10° , процент капель, которые осаждаются на рельефную поверхность после соударения, становится практически одним; то есть каждая капля с каждого расстояния на входе в сопло движется и ударяется о рельефную поверхность, вся капля после соударения оседает на ней.

Таблица 2 - Сравнение массовой доли капель спектра, выплеснутых после соударения о гладкую поверхность сопла и рельефную поверхность сопла с разными углами канавки β для разных точек входа спектра капель на входе в сопло С-9015 А

	локация (х, см)	% на гладкую поверхность	% $\beta =$ 60°	% $\beta =$ 30°	% $\beta =$ 20°	% $\beta =$ 15°	% $\beta =$ 10°	% $\beta =$ 7°	% $\beta =$ 5°
1	-22 см	1	1	0,999	0,999	0,973	0,447	0	0
2	-19 см	1	1	0,999	0,999	0,995	0,806	0	0
3	-16 см	1	1	0,999	0,999	0,999	0,915	0	0
4	-14 см	1	1	0,999	0,999	0,999	0,915	0,226	0
5	-12 см	1	1	1	1	0,999	0,915	0,226	0
6	-10 см	1	1	1	1	0,999	0,915	0,226	0

В этой работе (см. Рисунок 15) рельефная поверхность в направлении, перпендикулярном потоку пара, была размещена на сопле С-9015А.

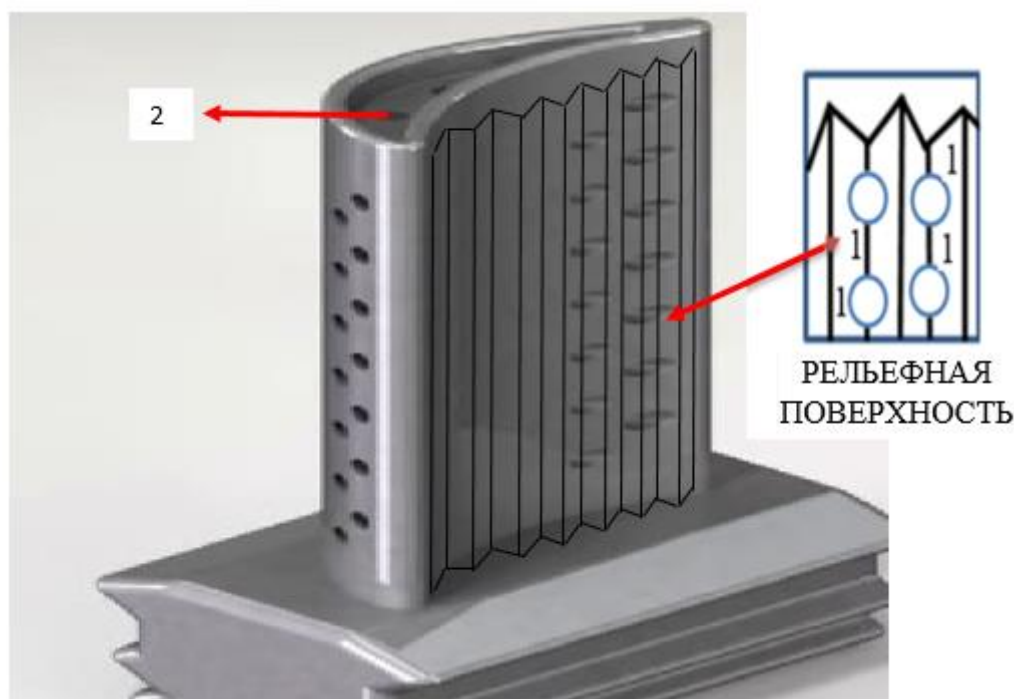


Рисунок 15- Лопатка с рельефной поверхностью (1-отверстия Сепаратора на поверхности и 2-центральное отверстие для переноса отделенной влаги из отверстий сепаратора в корень сопла)

Также была исследована энергия эрозии на плоской и рельефной поверхности сопла С-9015А в направлении, перпендикулярном потоку пара, с глубиной канавок 5, 4 и 3мм и различными углами канавок β (См. на Рисунках 16 и 17). Результаты на Рисунке 16 показывает, что хотя для глубины 5 мм под углом 150° суммарная энергия эрозии капель на рельефной поверхности меньше, чем энергия эрозии капель на гладкой поверхности, но для остальных углы канавки, общая энергия эрозии по сравнению с гладкой поверхностью увеличивается.

Как показывают результаты (см.Рисунок 17), для канавки 4 мм, если вместо плоской поверхности используется рельефная поверхность, энергия эрозии лопатки сопла увеличивается по сравнению с плоской поверхностью сопла. Таким образом, эти канавки, перпендикулярные

направлению пара, не могут быть применены для цели уменьшения эрозии лопаток. Результаты для глубины 3 мм были аналогичны результатам для глубины 4 мм.

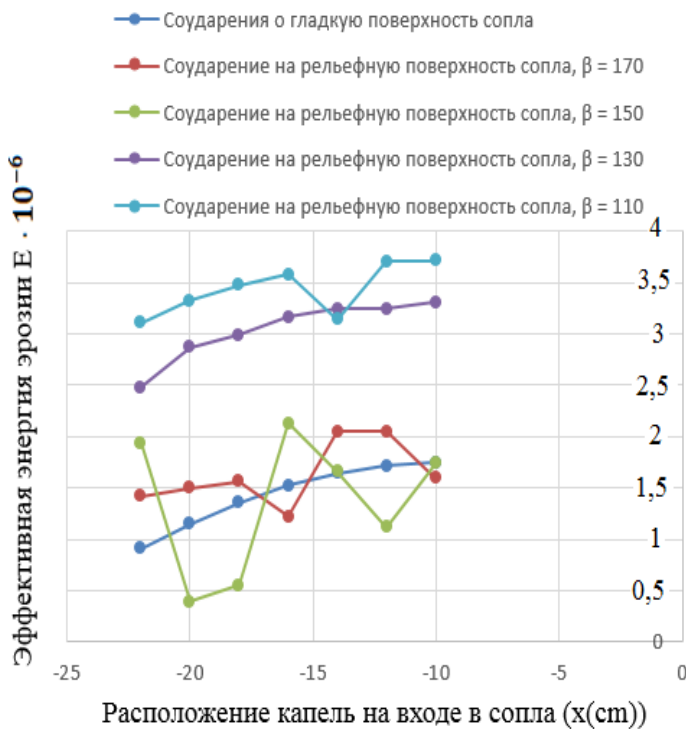


Рисунок 16- Сравнение эффективной энергии эрозии ($E \cdot 10^{-6}$) спектра капель при соударения о гладкую поверхность сопла и рельефную поверхность с глубиной канавки 5 мм и разными углами канавки.

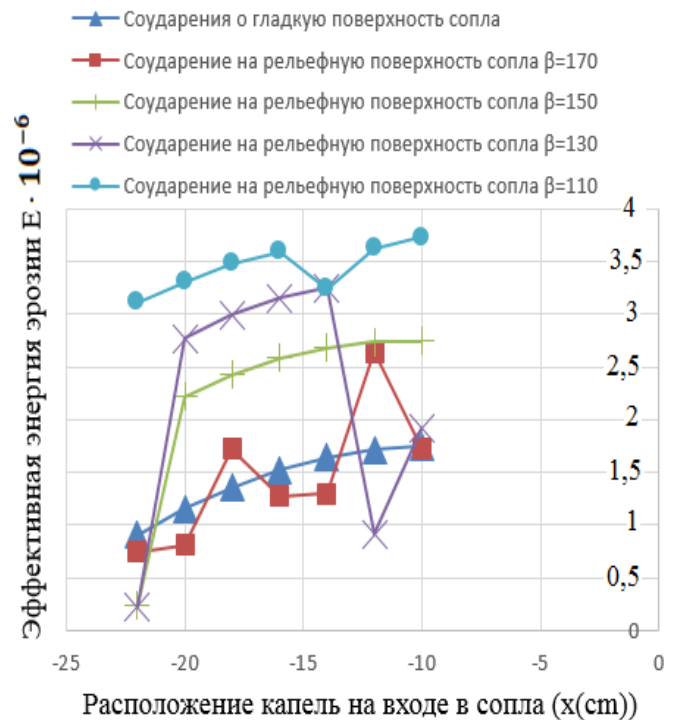


Рисунок 17 - Сравнение эффективной энергии эрозии ($E \cdot 10^{-6}$) спектра капель при соударения о гладкую поверхность сопла и рельефную поверхность с глубиной канавки 4 мм и разными углами канавки.

Заключение

Для достижения поставленной цели диссертантом был произведен выбор инструмента численного исследования. Были рассмотрены математические модели и программа на ее основе CFD-программа. Диссертант выполнил моделирование.

На основе исследований разработаны численные модели осаждения и движения влаги в межлопаточных каналах сопловой решетки с учетом ее взаимодействия с плоскими и рельефными поверхностями лопаток С-9015А.

В данной работе по результатам экспериментальных работ собрано и проанализировано с целью их использования множество моделей движения влаги, взаимодействия капель с диаметрами 0-250 мкм на рельефных, плоских, шероховатых и смоченных поверхностях, а также их осаждения на различных поверхностях.

В данной работе экспериментальные результаты в различных работах взаимодействия капель на плоскую поверхность были использованы и представлены модели взаимодействия влаги на рельефную и плоскую поверхность сопла, осаждения влаги на рельефной поверхности. Также были спроектированы и предложены лопатки сопла с рельефными поверхностями для сепарации влаги.

С помощью модели взаимодействия капли с поверхностью проведено сравнение энергии эрозии при столкновении капель диаметрами 0-120 мкм на поверхности лопатки сопла с рельефной поверхностью с канавками в диапазоне углов β от 30 до 120 мкм глубиной от 1,5 до 4,5 мм при перепаде температуры $\Delta T = 7,5^\circ$ на последней ступени турбины с энергией эрозии при столкновении

влаги на поверхности лопатки сопла с гладкой поверхностью и было установлено, что если канавки на поверхности сопла расположены в направлении движения пара, эрозия лопаток снижается при всех углах канавок.

Исследовано столкновение влаги на поверхности сопла с рельефной поверхностью с канавками в диапазоне углов β от 5 до 60 мкм и было определено, какой должен быть угол канавок ($\beta < 6^\circ$), чтобы на лопаток сопла было наибольшее осаждения и наименьшая эрозия.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации автором опубликовано 7 печатные работы:

1. Фокин Г.А., Забелин Н.А., Хемати М. Микрорельефные поверхности как средство снижения эрозии лопаточных аппаратов в паровых и газовых турбинах // Наука и техника в газовой промышленности. – 2023. – URL: <https://elibrary.ru/hpudmk?ysclid=lt5evbskql105750642>
2. Фокин Г.А., Забелин Н.А., Хемати М. Повышение эффективности сепараторов в последних ступенях паровых турбин за счет использования поверхностей с микроканавками. Наука и техника в газовой промышленности. 2024. № 1. С. 89-98.
3. Hemati, M., Zabelin, N., Fokin, G., Jayasinghe, N. Increasing Nozzle Blade Deposition on Steam Turbine C-9015A by Adding Parallel Grooved Surface. In: Sun, Z., Das, P.K. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Energy Engineering and Environmental Engineering. ICEEEE 2023. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham, 2024. С. 100. DOI: 10.1007/978-3-031-48204-5_7
4. Hemati, M., Zabelin, N., Fokin, G., Jayasinghe, N. Reducing the Erosion of Nozzle Blade C-9015A in Steam Turbine with the Help of Parallel Grooved Surface // 2023 2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET) – Shanghai, China – DOI: 10.1109/APET59977.2023.10489532
5. Hemati, M., Zabelin N. A., Jayasinghe N. Improvement of Wet-steam Turbines for Power Plants by Reducing the Erosion // 2023 Seminar on Industrial Electronic Devices and Systems (IEDS) – Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. – С. 104-108. – DOI: 10.1109/IEDS60447.2023.10425806.
6. Hemati, M., & Zabelin, N. A. Algorithm for Droplet Motion around Weber Number with Fortran // International Journal of Innovative Science and Research Technology. – 2022. – № 23. – URL: [https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT22JUL118_\(1\).pdf](https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT22JUL118_(1).pdf)
7. Hemati, M., Zabelin N. A., Jayasinghe N. Optimum Blade Geometry C-9015A to Reduce Blade Erosion// 2024 In: Janmanee, P., et al. Advanced in Creative Technology- added Value Innovations in Engineering, Materials and Manufacturing (ICCT). – DOI: //doi.org/10.1007/978-3-031-59164-8_2