

## ***Создание научно-технического задела для разработки угольных энергоблоков с ультрасверхкритическими параметрами пара***

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.574.21.0098 от 22 августа 2014 г. с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 4 в период с 01 января 2016 г. по 30 июня 2016 г. были выполнены следующие работы:

1. Проведены численные эксперименты по изучению структуры течения рабочей среды в экспериментальных моделях элементов нового оборудования энергоблока и оптимизации их конфигурации.
2. Изготовлены экспериментальные стенды: экспериментальный стенд для исследования моделей турбинных решеток, экспериментальный стенд для исследования аэродинамики топочных процессов, экспериментальный стенд для исследования экспериментальных образцов блока стопорно-регулирующих клапанов. Изготовлена экспериментальная установка фильтра-регенератора смешанного слоя ионитов для системы блочной обессоливающей установки котлов УСКП, поддерживающих заданное качество конденсата.
3. Изготовлены физические модели: модель топочной камеры горизонтального котла, модель турбинной решетки без ребер, модель турбинной решетки с двухсторонним оребрением одним ребром прямоугольной формы, модель блока стопорно-регулирующих клапанов.
4. Осуществлен монтаж: экспериментального стенда для исследования аэродинамики топочных процессов, экспериментального стенда для исследования моделей турбинных решеток, экспериментального стенда для проведения исследований экспериментального образца блока стопорно-регулирующих клапанов.
5. На изготовленных экспериментальных стендах при помощи изготовленных моделей проведены экспериментальные исследования: экспериментальные исследования аэродинамики топочных процессов в котельных агрегатах УСКП, экспериментальные исследования моделей турбинных решеток, экспериментальные исследования образцов блока стопорно-регулирующих клапанов. Также было проведено исследование влияния качества воды на скорость процесса коррозии в предложенных материалах и исследование по выбору реагентов для коррекции качества воды для минимизации скорости процесса коррозии и образования отложений.
6. Сформулированы выводы об эффективности предложенных технических решений в части совершенствования элементов нового энергетического оборудования и заключение о соответствии их характеристик требованиям технического задания.

**В ходе выполненных серий численных и физических экспериментов на IV этапе были получены научные результаты:**

1. В части исследования модели топочной камеры было установлено:

1.1. Продольное размещение холодных воронок в модели горизонтальной топки котельного агрегата снижает интенсивность образования вторичных течений и обеспечивает нормальное шлакоудаление, характеризующееся выпадением не более 5-7% твердых частиц. На рисунке 1 представлена эпюра скорости потока воздуха с визуализацией линий тока в модели горизонтальной топки котла с продольными холодными воронками.

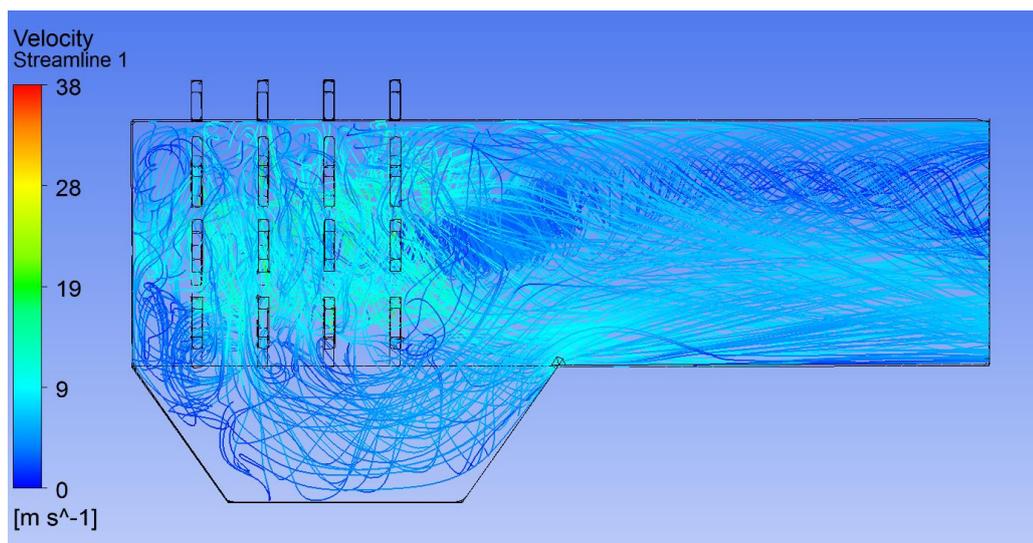


Рисунок 1 – Эпюра скорости потока воздуха с визуализацией линий тока в модели горизонтальной топки котла с продольными холодными воронками

1.2. Определена наилучшая схема включения горелок в горизонтальной топке котла. Определено, что получение симметричного кольцевого вихря, расположенного в геометрическом центре поперечного сечения топки, и сохранение такого положения по всей длине топочной камеры можно обеспечить расположением горелочных устройств в соответствии с рисунком 2. Эпюры скорости потока воздуха, полученные для новой схемы включения горелок, представлены на рисунке 3 и рисунке 4.

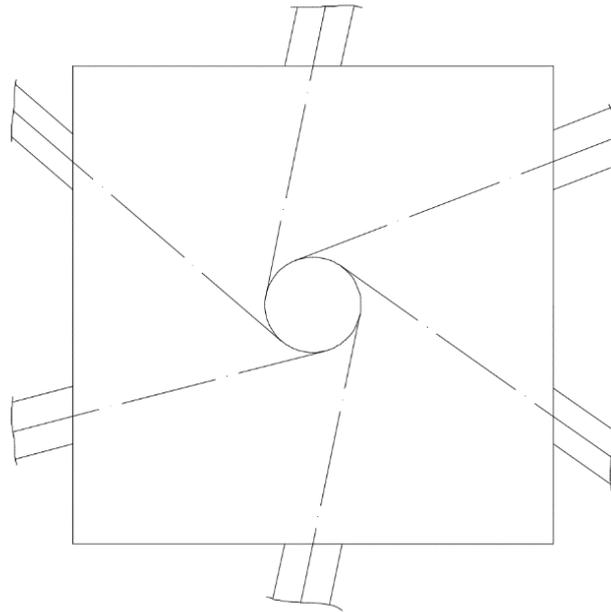


Рисунок 2 – Схема нового включения горелок

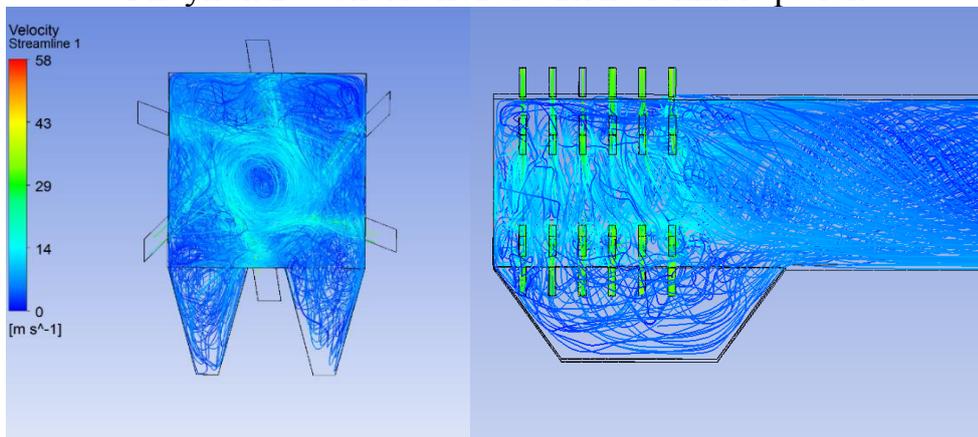
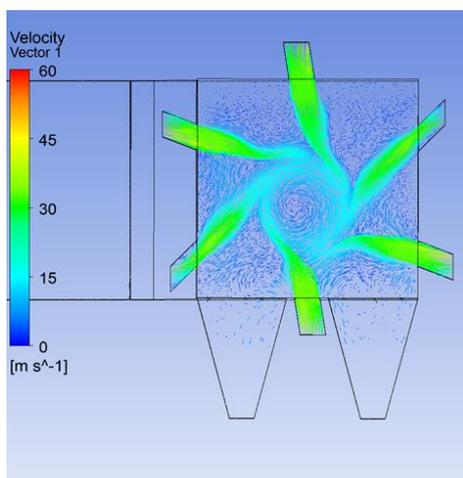
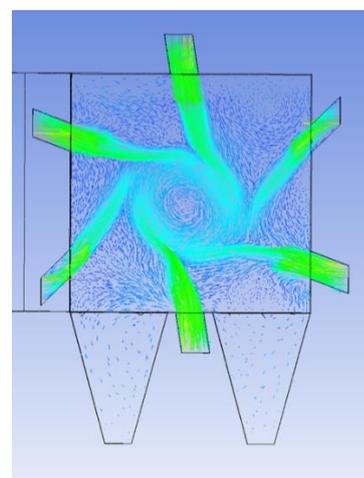


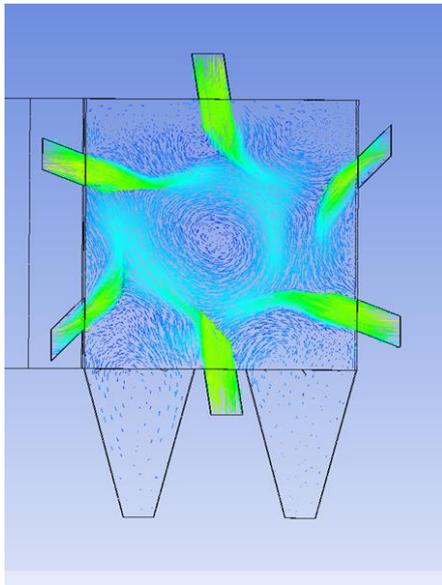
Рисунок 3 – Эпюры скорости потока воздуха с визуализацией линий тока. Модель горизонтальной топки с новой схемой включения горелок



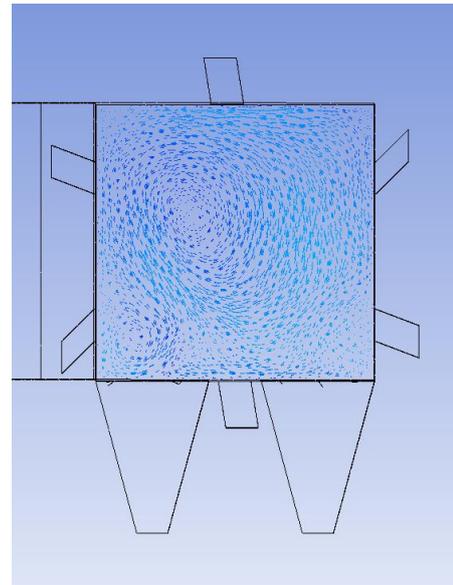
а)



б)



в)



г)

а) срез первого яруса горелок; б) срез второго яруса горелок;  
 в) срез третьего яруса горелок; г) срез на выходе из топочной камеры  
 Рисунок 4 – Векторы скорости потока воздуха в поперечных сечениях модели топки

1.3. Равномерный профиль скорости на входе в конвективные поверхности нагрева, расположенные за поворотом газохода, может быть получен за счет применения поворота газохода со скошенными внешней и внутренней кромкой. Конструкция поворота представлена на рисунке 5.

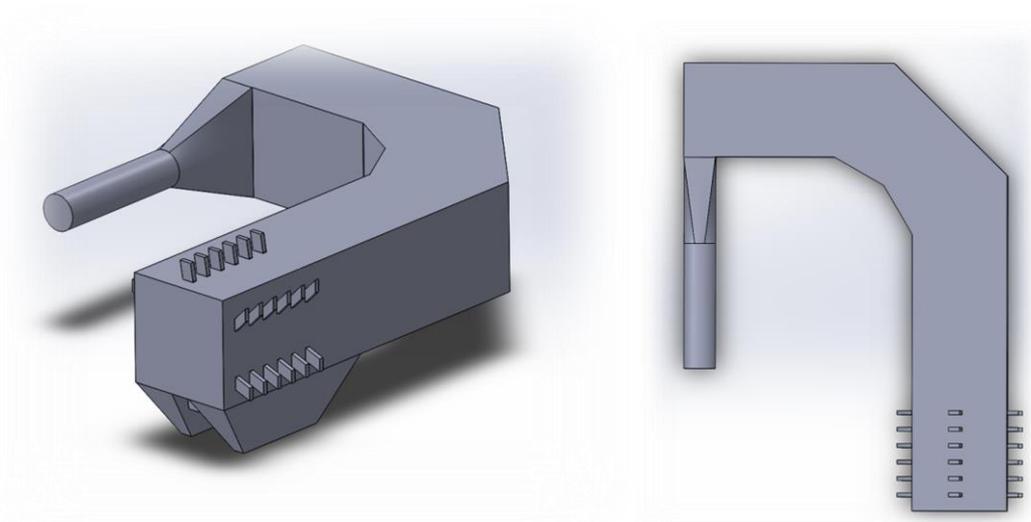


Рисунок 5 – Конструктивный профиль модели горизонтальной топки со скошенными кромками поворота потока

Эпюры скорости потока воздуха, полученные для модели горизонтальной топки со скошенными кромками, представлены на рисунке 6.

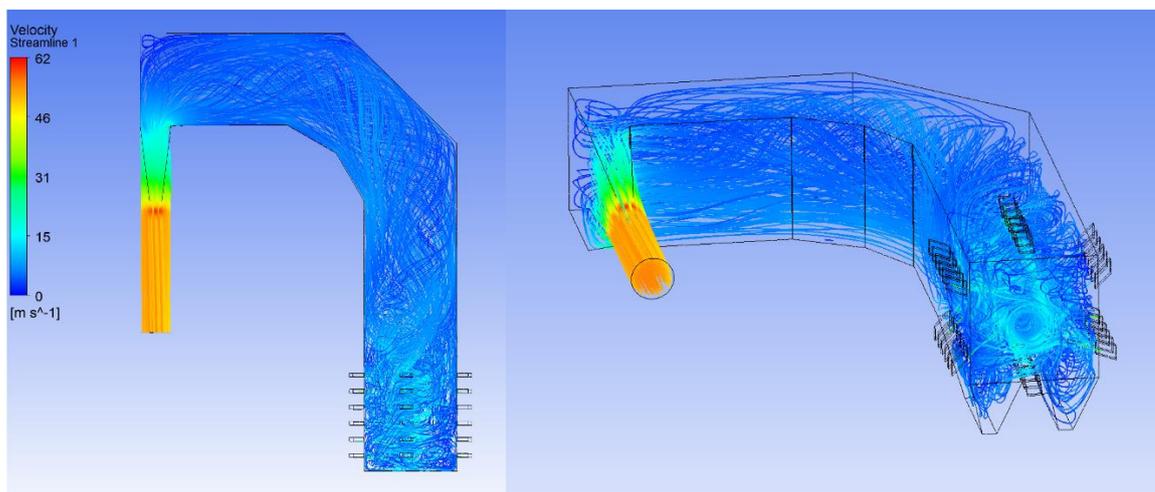


Рисунок 6 – Эпюры скорости с визуализацией линий тока в модели горизонтальной топки котла с поворотом со скошенными кромками

2. В части исследования моделей турбинной решетки:

2.1. Определено, что значительное влияние на коэффициент конечных потерь оказывает высота и количество прямоугольных ребер.

2.2. По сравнению с моделью турбинной решетки без ребер установка двухстороннего оребрения одним ребром с высотой 2 мм и толщиной 0,5 мм привела к снижению коэффициента конечных потерь на 2,266%.

2.3. По сравнению с моделью турбинной решетки без ребер установка двухстороннего тройного оребрения с высотой ребер 2 мм и толщиной 0,5 мм привела к увеличению коэффициента конечных потерь на 10,8%.

2.4. По сравнению с моделью турбинной решетки без ребер установка двухстороннего оребрения одним ребром с высотой 3 мм и толщиной 0,5 мм привело к снижению коэффициента конечных потерь на 1,8%

Полученные на основе экспериментальных данных средние значения коэффициента потерь в модели турбинной решетки без оребрения и с двусторонним оребрением представлены в таблице.

Таблица – Средние значения коэффициента потерь в модели турбинной решетки без оребрения и с двусторонним оребрением

Показатель	Среднее значение коэффициента потерь в решетке для режима				
	Относительное давление в режиме				
	0,97	0,85	0,75	0,7	0,65
Модель без оребрения (базовый вариант)	0,2899	0,2782	0,2721	0,2694	0,2669
Модель с двухсторонним оребрением с одним прямоугольным ребром высотой 2 мм и шириной 0,5 мм	0,2809	0,2709	0,2663	0,2644	0,2626
Разница значений коэффициентов потерь	0,009	0,0073	0,0058	0,005	0,0043
Снижение коэффициента потерь в сравнении с моделью без оребрения (базовый вариант), %	3,10	2,63	2,13	1,86	1,61

Поскольку конфигурация турбинной решетки с двухсторонним оребрением с одним прямоугольным ребром высотой 2 мм и толщиной 0,5 мм обеспечила наименьший коэффициент конечных потерь, значение которого оказалось ниже конечных потерь решетки без ребер, данная конфигурация была признана наиболее эффективной и по своим характеристикам соответствующей требованиям технического задания в полной мере. Физическая модель данной турбинной решетки представлена на рисунке 7.

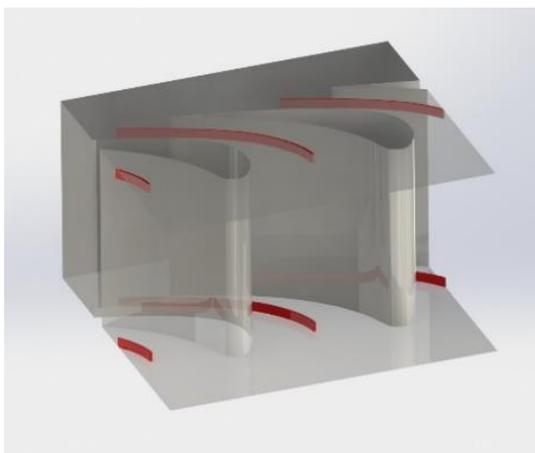


Рисунок 7 – Модель турбинной решетки с двухсторонним оребрением с одним прямоугольным ребром высотой 2 мм и толщиной 0,5 мм

3. В части исследования моделей блока стопорно-регулирующих клапанов:

3.1. При испытаниях модели блока СРК на режимах, соответствующих режимам реальной эксплуатации клапанов, была определена величина аэродинамических потерь, которая на степенях открытия 0,25-1 не превысила 2,48%. Полученная экспериментальным путем расходная характеристика представлена на рисунке 8.

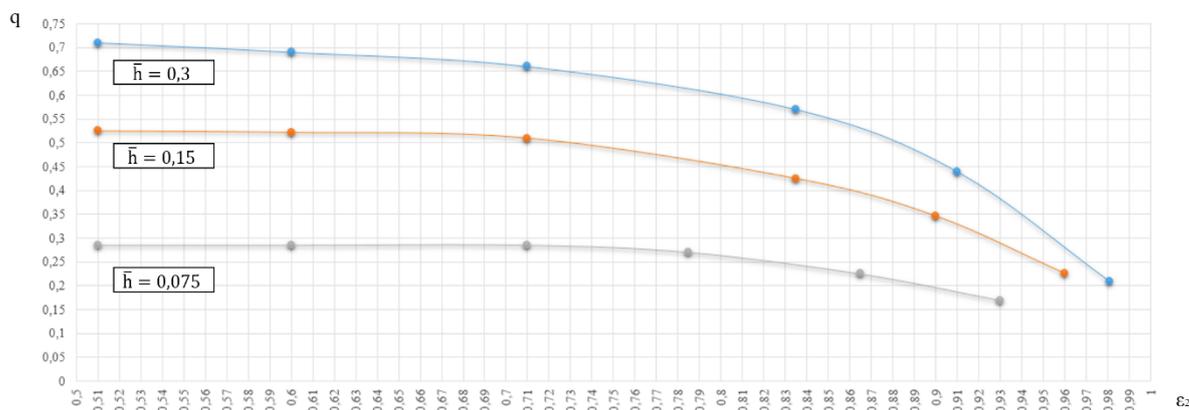


Рисунок 8 – Экспериментальная расходная характеристика экспериментальной модели блока СРК

3.2. Статические усилия, возникающие на штоке клапана при изменении положения от полного закрытия до полного открытия при

значениях относительного давления 0,6-0,99 не превысили 18 тонн в пересчете на полноразмерных клапан, работающий на ультрасверхкритических параметрах пара. Полученная экспериментальным путем силовая характеристика представлена на рисунке 9.

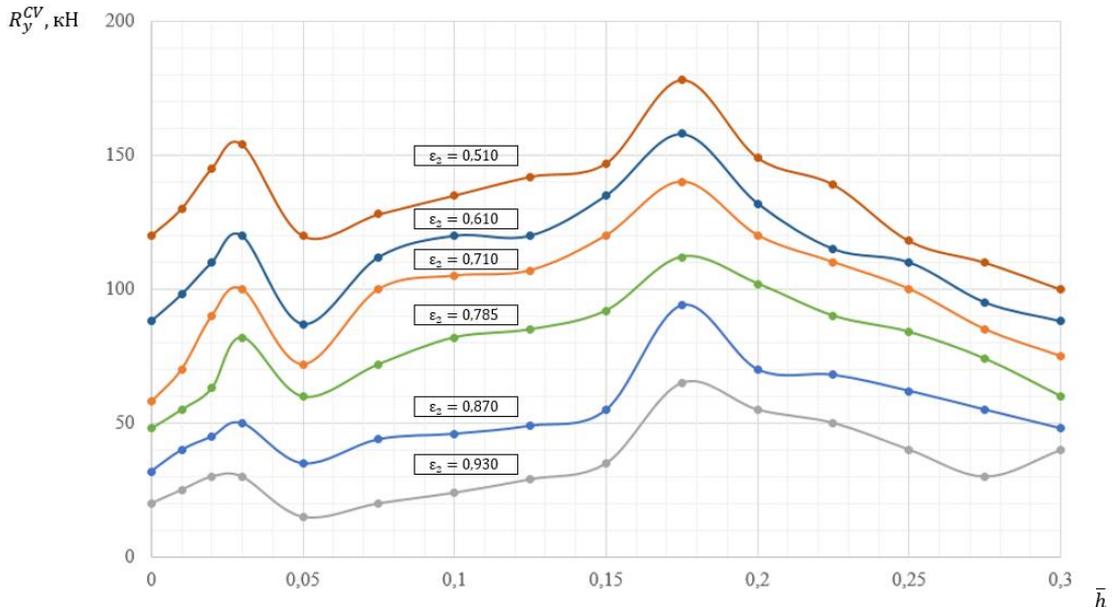
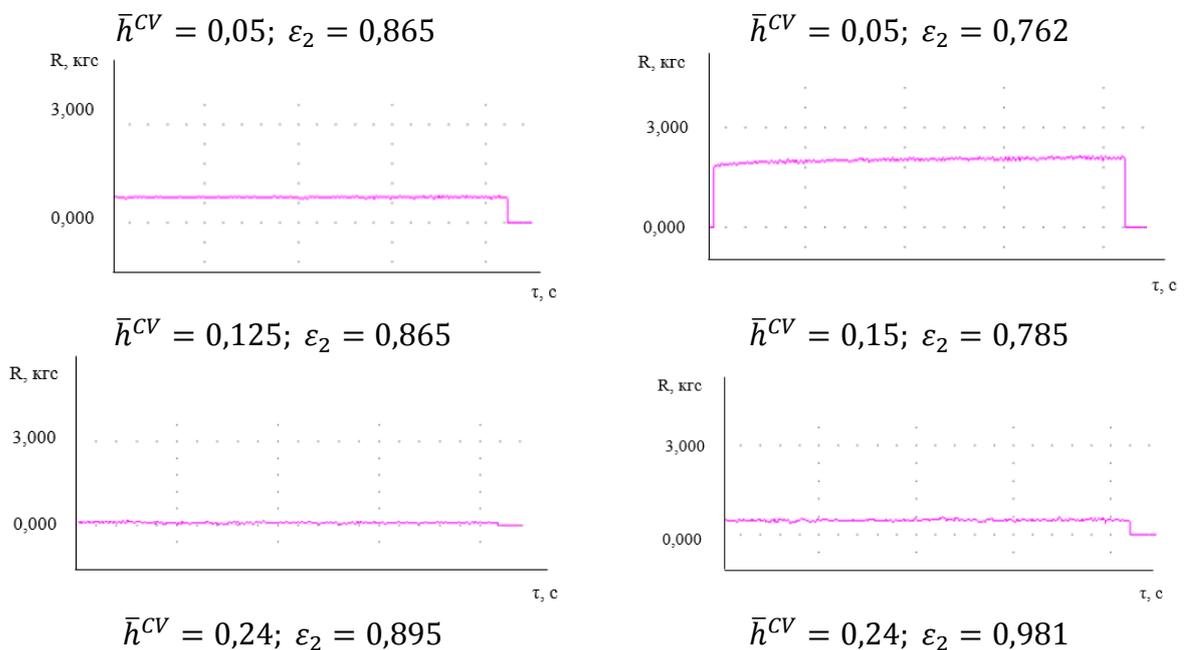


Рисунок 9 – Силовая характеристика, пересчитанная на натурный блок СРК для турбины, работающей на УСКП пара

3.3. Амплитуда динамических нагрузок, воспринимаемых штоками блока СРК, во всем диапазоне режимов испытаний не превысила 7,5% от статических усилий. Максимальные амплитуды колебаний усилий были зафиксированы при степени открытия клапана 80%. Изменение во времени амплитуды пульсаций осевого усилия на штоке модельного блока СРК при различных степенях открытия и значениях относительного давления представлено на рисунке 10.



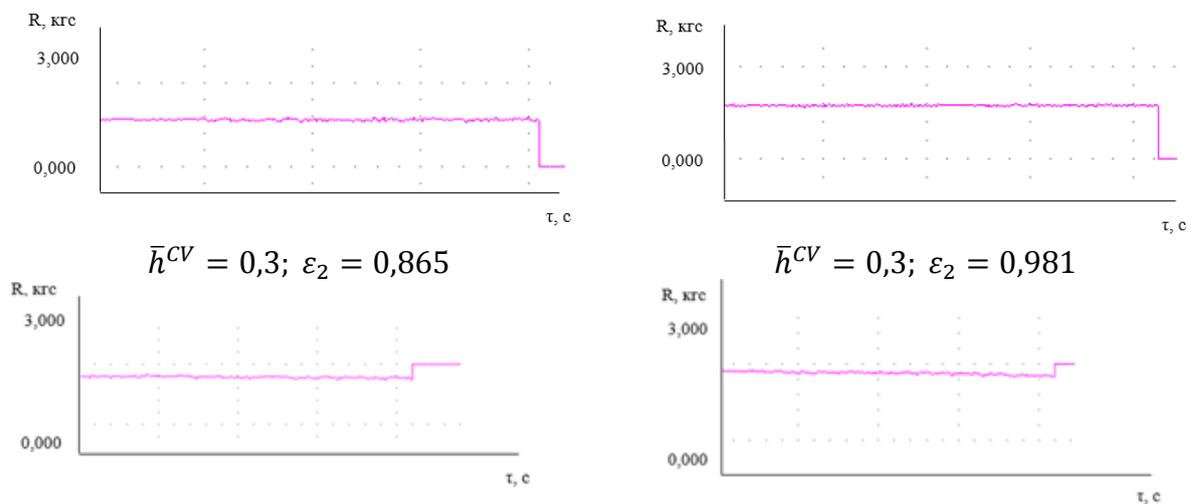


Рисунок 10 – Изменение во времени амплитуды пульсаций осевого усилия на штоке модельного СРК

4. В части исследования влияния качества воды на интенсивность протекания процесса коррозии и определения состава реагентов, снижающего его скорость:

4.1. Согласно полученным экспериментальным данным при температуре пара до  $800^{\circ}\text{C}$  наименьшую скорость коррозии для сплава ДСЖ 3, химический состав и схему легирования которого были разработаны в ходе выполнения данного проекта, и сплава Alloy 740Н обеспечивает нейтрально-кислородный водный режим (НКВР). Изменение массы образцов, измеренное в ходе серии экспериментов на НКВР, оказалась на 21,28 % меньше для ДСЖ 3 и на 48,78% меньше для Alloy 740Н, чем при аналогичных испытаниях с ведением кислородно-аммиачного водного режима (КАВР). Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены на рисунке 11.

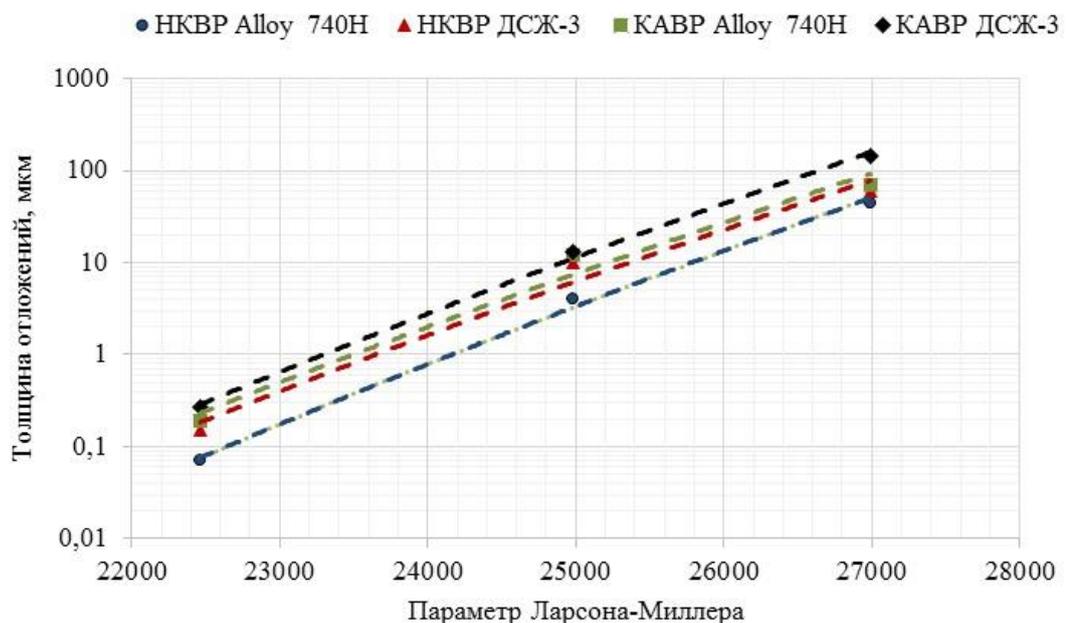


Рисунок 11 – График изменения толщины стенки образца при НКВР и КАВР

4.2 Было определено, что скорость коррозии может быть дополнительно снижена путем изменения концентрации кислорода при подготовке воды. Для температуры пара меньшей скорости изменения массы образца соответствовала концентрация кислорода 100 мкг/кг. Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены на рисунке 12.

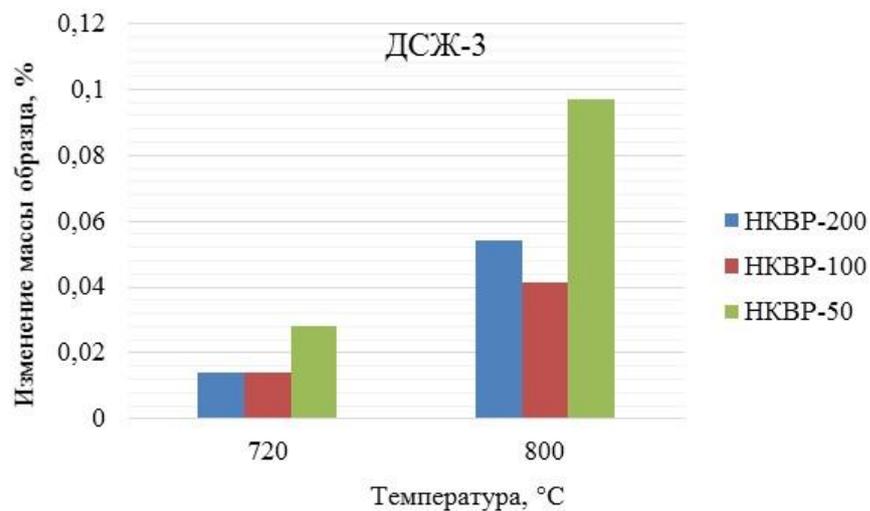


Рисунок 12 – Гистограмма изменения массы образца при ведении НКВР с различной концентрацией кислорода

5. Индустриальный партнер по проекту изготовил экспериментальную установку фильтра-регенератора смешанного слоя ионитов для системы блочной обессоливающей установки котлов УСКП, поддерживающих заданное качество конденсата. Фотография установки представлена на рисунке 13.

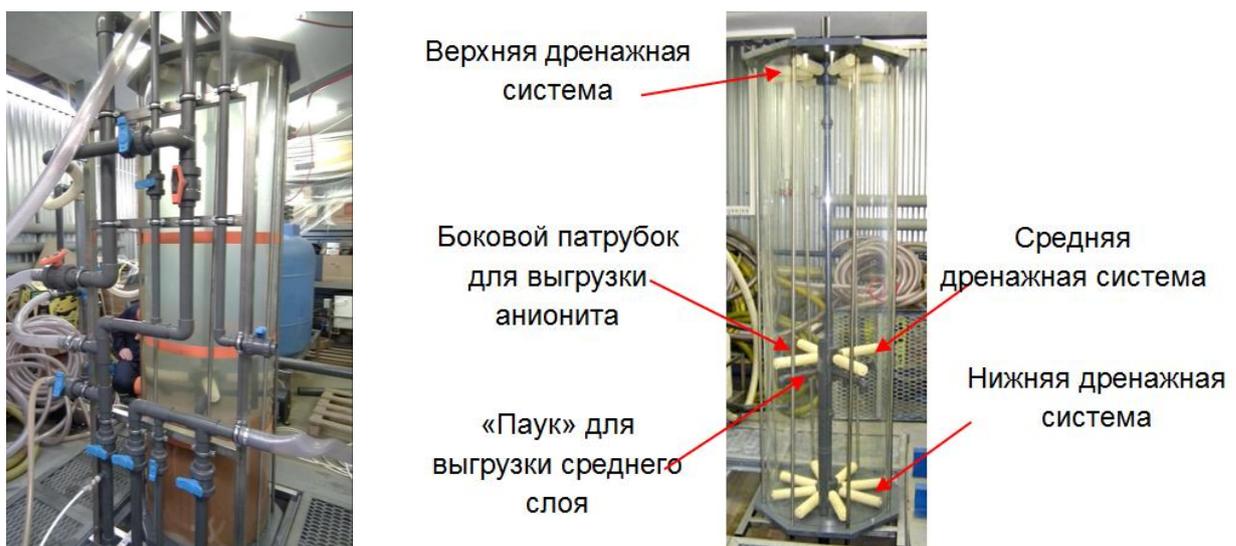


Рисунок 13 – Внешний вид экспериментальной установки фильтра-регенератора смешанного слоя ионитов для системы блочной

обессоливающей установки котлов УСКП, поддерживающих заданное качество конденсата с указанием его узлов

#### **Оценка элементов новизны результатов работ по IV этапу**

Полученные в ходе реализации проекта результаты обладают высокой степенью научной новизны, а разработанные новые технические решения по ряду показателей эффективности не уступают и превосходят существующие аналоги.

Новая конфигурация холодных воронок, схема включения горелочных устройств и конструкция поворота газохода со скошенными кромками разработаны для предложенной в рамках проекта совершенно новой горизонтальной компоновки котельного агрегата, рассчитанного на работу при ультрасверхкритических параметрах пара.

Оребрение бандажей турбинных решеток цилиндра высокого давления является новаторским решением, предложенным коллективом исполнителей астоящего прикладного научного исследования. На данном этапе была выполнена численная и экспериментальная проработка различных вариантов конструкции ребер, среди которых была выбрана та, что обеспечивает минимальное значение коэффициента концевых потерь энергии.

Также на четвертом этапе проекта были выполнены экспериментальные исследования новой конструкции блока стопорно-регулирующих клапанов, разработанной на втором этапе ПНИ, в ходе которых были подтверждены все заявленные характеристики, а именно: низкое значение коэффициента аэродинамического сопротивления, низкие статические и динамические усилия на штоках клапанов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о высоком техническом уровне разработанного решения и опережении им по ряду важных показателей ближайших аналогов.

На четвертом этапе также были проведены исследования влияния качества воды на интенсивность протекания процесса коррозии и определения состава реагентов, снижающего его скорость. При этом были проведены испытания на образце материала, состав и схема легирования которого была разработана в рамках текущего проекта. Аналогичных экспериментов, проведенных при температурах пара до 800°C с использованием реагентов, обычно применяемых при подготовке воды на ТЭС, в отечественной и зарубежной научной литературе выявлено не было.

В ходе выполнения работ на IV этапе число патентных заявок, поданных по результатам исследований и разработок, составило – 1 шт. (заявка на изобретение «Жаропрочный и коррозионностойкий сплав на основе никеля для изготовления деталей котлов, паровых и газовых турбин»).

Копия уведомления патентных ведомств о поступлении заявок: уведомление ФИПС № 2016120981 от 30.05.2016 г.

**Оценка соответствия полученных результатов работы техническим требованиям к выполнению проекта и оценка перспектив продолжения проекта**

Все обозначенные в плане-графике работы выполнены в полном объеме. Полученные результаты полностью соответствуют требованиям технического задания и позволяют перейти к заключительным работам, запланированным на V этапе реализации проекта.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.