АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071700 – Теплоэнергетика»

ШАВДИНОВОЙ МАДИНЫ ДЖАЛАЛДИНОВНЫ

Математическое моделирование элементов конденсационной установки при исследовании и разработке способов повышения эффективности работы ТЭЦ

В диссертационной работе исследования выполнялись по одному из приоритетных направлений развития науки Казахстана «Энергетика и машиностроение».

По данным системного оператора (АО «KEGOK», Национальный энергетический доклад, 2021 г.) в Казахстане основу генерации свыше 82% составляют тепловые электростанции (ТЭС), работающие на твердом (69%) и газообразном (20%) топливе.

В Казахстане эксплуатируется 68 ТЭС, из которых: 41 ТЭЦ, при этом 60% централизованного теплоснабжения приходится на ТЭЦ.

Конденсационная установка является важнейшей технологической системой, в значительной степени определяющей эффективность и надежность работы паротурбинных установок (ПТУ) ТЭС.

Изменение давления пара в конденсаторе на 1 кПа вызывает изменение мощности турбины примерно на 1%. Нарушения в работе конденсационной установки приводят к снижению экономичности и аварийным остановам ПТУ. Это сказывается и на КПД станции, и на расходе топлива.

Из анализа литературных данных известно, что наибольший процент отказов - 37% приходится на долю собственно турбины, до 13% относятся к конденсационной установке и системе регенерации турбины.

Анализ повреждений (отказов) элементов конденсационной установки показывает, что наибольшая доля отказов приходится на конденсаторы 46% и на эжекторы - 19%.

Особенностью конденсационной установки ТЭЦ является то, что конденсаторы наряду с основным имеют встроенный трубный пучок. В большинстве исследований рассматривались методики для расчета только основных пучков.

Одной из важных задач на ТЭЦ является проведение диагностики и мониторинга состояний конденсационной установки и своевременного устранения неисправностей.

Глубокому пониманию процессов, происходящих в элементах конденсационной установки, анализу режимов их работы, конструктивному исполнению, влиянию различных факторов на надежность эксплуатации способствует создание математической модели конденсационной установки и проведение вычислительных экспериментов.

В диссертационной работе представлены результаты математического моделирования элементов конденсационной установки (КУ) (конденсатора, эжектора) при исследовании повышения эффективности работы ТЭЦ. Среди способов повышения эффективности КУ предложены методики разработки новых расширенных нормативных характеристик конденсатора, диагностики состояния КУ, переход на двухступенчатый эжектор, разработана диагностическая модель оценки рисков потери эффективности КУ, для ТЭС разработан CU-код.

Актуальность темы исследования.

На основании анализа опубликованных результатов исследований можно констатировать, что конденсационной установке на ТЭЦ Казахстана уделяют незначительное внимание.

На станциях Казахстана не достаточно активно используются методики мониторинга, диагностирования и оценки состояния конденсационной установки, тем более опирающиеся на математические модели.

На ТЭС Казахстана не полностью внедрена возможность оперативного управления и прогнозирования потери безопасности, работоспособности, исправности и эффективности конденсационной установки.

Не используются результаты математического моделирования, обеспечивающие диагностику, оперативное управление, прогнозирование сроков эксплуатации и расширение диапазонов параметров конденсационной установки.

Несомненная актуальность разработки математических моделей элементов конденсационной установки, систем диагностики, оперативного управления и прогнозирования подчеркивается их реализацией в рамках информационных комплексов ТЭЦ.

Область, в которой решается научная проблема – повышение эффективности и надежности работы ТЭЦ.

Объект исследования – конденсационная установка паровой теплофикационной турбины Т-110/120-130-5 АлЭС ТЭЦ-2. КУ состоит из конденсатора КГ2-6200 со встроенными и основными пучками, двух трехступенчатых пароструйных эжекторов, четырех конденсатных насосов, двух циркуляционных насосов.

Предметом исследования является разработка моделей для оценки состояния и диагностирования оборудования конденсационных установок в целях прогнозирования и повышения надежности и эффективности паровых турбин ТЭС.

Целью исследования является разработка математических моделей элементов конденсационной установки на основании новых методических подходов и технических решений и внедрение результатов диссертационной работы на ТЭЦ для обеспечения повышения качества прогнозирования надежной и эффективной работы конденсационной установки паровой турбины.

Цель достигается путем выполнения следующих **задач**:

– библиографический обзор по теме диссертации;

– сбор информации о конденсационной установке АлЭС ТЭЦ-2;

– обработка результатов промышленного эксперимента на конденсационной установке АлЭС ТЭЦ-2;

– анализ методики расчета конденсатора паровой турбины для определения подходящей для использования методики;

– разработка математической модели конденсатора с учетом работы основных и встроенных трубных пучков;

– программная реализация и апробация в серии вычислительных экспериментов разработанной модели конденсатора;

– математическое моделирование пароструйного эжектора;

– программная реализация и апробация в серии вычислительных экспериментов разработанной модели эжектора;

– проведение модельной диагностики конденсатора, включающая анализ влияния присосов воздуха и загрязнений на давление пара внутри конденсатора;

– анализ рисков в отношении возможной потери эффективности, надежности, функциональности и безопасности конденсационного оборудования;

– создание программного комплекса «Condensing Unit» (CU-код) для ТЭЦ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели конденсатора и эжектора, применяемые в теплофикационных станциях с турбинами типа Т. Модели были проверены и протестированы на соответствие условиям работы АлЭС ТЭЦ-2. Программный продукт, реализованный в табличном редакторе Microsoft Excel, включает в себя математические модели конденсатора и эжектора. Предлагаемая в модели методика учитывает особенности определения давления пара в различных зонах конденсатора при подаче в основные пучки – охлаждающей воды, во встроенные пучки – сырой воды. Получена зависимость для расчета параметров пара в конденсаторе с основными и встроенными пучками труб. Разработанная методика может использоваться для экстраполяции нормативных характеристик конденсатора в область расходов пара больше $D_к > 78$ кг/с (280 т/ч).

2. Получено, что при барометрическом давлении в конденсаторе турбины ниже 100 кПа целесообразна установка нового основного двухступенчатого пароструйного эжектора вместо действующего (получен патент на полезную модель двухступенчатого эжектора). Установлено, что расход рабочего пара на двухступенчатый эжектор существенно (на 30%) ниже, чем на трехступенчатый, что приводит к экономии пара и, в конечном счете, топлива на собственные нужды ТЭЦ.

3. На основе разработанной модели учета раздельного подсоса воздуха и загрязненной поверхности конденсатора паровой турбины АлЭС ТЭЦ-2

установлено, что отклонение фактических показателей конденсатора от нормативных (расчетных) показателей определяется в основном загрязнением трубок конденсатора. Присосы воздуха в большинстве режимов не оказывают влияния.

4. На основе проведенного полного многоуровневого анализа эксплуатационных рисков оборудования конденсационной установки определены вероятности различных типов нарушений функционирования конденсатора: потеря безопасности составляет 29%, потеря работоспособности – 55%, потеря исправности – 50%, потеря эффективности 17%.

5. Впервые автором получен программный комплекс «Condensing Unit» (CU-код), включающий следующие модули: математические модели конденсатора и пароструйного эжектора, диагностическую модель конденсатора, дерево событий, двухступенчатый эжектор. Разработанные модули взаимосвязаны между собой, но могут использоваться по отдельности. CU-код передается ТЭЦ для дальнейшего использования вместе с рекомендациями рабочему персоналу ТЭЦ по повышению эффективности работы конденсационной установки ТЭЦ.

Полученные результаты диссертационной работы имеют **научную и практическую ценность**:

– Представлены математические модели и программы расчета конденсатора и пароструйного эжектора, которые рекомендованы для использования в целях диагностики и мониторинга состояния оборудования, а также проведения энергетического аудита станции.

– Представлены математические модели конденсатора и пароструйного эжектора, которые могут использоваться в процессе обучения теплоэнергетиков при проведении виртуальных лабораторных работ.

– По результатам обработки промышленного эксперимента получена зависимость для определения давления пара в конденсаторе, имеющего основные и встроенные пучки труб, позволяющая получать нормативные характеристики конденсатора на весь диапазон изменения расходов пара.

– Представлена методика обработки экспериментальных данных для оценки технико-экономических показателей ТЭЦ.

– Комплекс программ CU-код решает практические задачи, направленные на повышение надежности и эффективности работы конденсационной установки АлЭС ТЭЦ-2 и ТЭС РК.

Достоверность полученных результатов подтверждается следующим:

1. Исследования проведены на действующем оборудовании с использованием актуальных данных, полученных на АлЭС ТЭЦ-2.

2. Разработанные математические модели конденсатора и эжектора апробированы на АлЭС ТЭЦ-2 с высокой точностью результатов.

3. Получены акты внедрения на результаты диссертационной работы от АлЭС ТЭЦ-2 им. А. Жакутова и АО «Институт «КазНИПИЭнергопром».

Положения и результаты исследования, выносимые на защиту:

1. Математическая модель конденсатора, ее программная реализация и результаты апробации.
2. Методика расчета конденсатора, учитывающая особенности определения давления пара в различных зонах конденсатора при подаче в основные пучки – охлаждающей воды, во встроенные пучки - сырой воды.
3. Математическая модель пароструйного эжектора, ее программная реализация и результаты апробации.
4. Полезная модель двухступенчатого пароструйного эжектора.
5. Методика, которая учитывает раздельное влияние присосов воздуха и загрязнений на давление пара в конденсаторе.
6. Анализ рисков потери эффективности конденсационной установкой с разработкой дерева событий.
7. Комплекс программ CU-код.

Основные положения отражены в **научных публикациях**: 15 научных статьях и докладах МНТК, в том числе: 5 научных статей в отечественных изданиях из списка рекомендованных КОКСНВО; 8 научных докладов в сборниках в международных научно-технических конференций; 2 научные статьи, индексируемые в базе Scopus: одна статья в журнале Journal of Applied Engineering Science (JAES) с процентилем на момент публикации 52% по разделу «Общая инженерия», одна статья в журнале Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika) с процентилем на момент публикации 42% по разделу «Энергетика и энергетические технологии». Имеется патент на полезную модель и разработаны методические указания к выполнению виртуальных лабораторных работ.

Личный вклад автора определяется целью и задачами исследования и состоит в проведении аналитического обзора литературных данных, расчетных исследований, разработкой математических моделей конденсатора и эжектора, создании программ расчетов на моделях в табличном редакторе MS Excel, разработки опросных листов для сбора информации с ТЭЦ, разработки анализа рисков потерь эффективности конденсационной установки, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Диссертационная работа выполнена автором в соответствии с действующими требованиями оформления, структуры и содержания. Работа состоит из 6 разделов, списка условных обозначений и сокращений, введения, заключения, списка использованной литературы и приложений. В состав работы входят 15 таблиц, 40 рисунков, 88 использованных источников.

Первый раздел содержит обзор аналитических исследований, посвященных повышению эффективности работы элементов конденсационной установке. Проведен анализ неисправностей в работе конденсационной установки; существующих способов диагностирования и мониторинга состояния оборудования; существующих методов расчета конденсатора и эжектора; применяемых на практике экспертных систем.

Второй раздел посвящен разработке математической модели конденсатора, имеющего основные и встроенные пучки труб. Представлены алгоритм расчета, система уравнений, позволяющая определять значения давлений пара в основном и встроенном пучках и программная реализация.

Представлены результаты обработки данных промышленного эксперимента. Проведена верификация результатов вычислительного эксперимента.

Третий раздел отражает процесс разработки математической модели пароструйного эжектора. Приведены программная реализация и верификация результатов вычислительного эксперимента.

Приведено обоснование замены основного эжектора. Представлен новый двухступенчатый пароструйный эжектор.

В **четвертом разделе** описана методология, которая позволяет учесть отдельное воздействие присосов и загрязнений. Важно отметить, что наибольшее влияние на давление пара оказывает загрязнение поверхности теплообмена. Поэтому необходимо регулярно очищать поверхность конденсатора от загрязнений, чтобы не допустить снижения эффективности конденсатора и повысить энергоэффективность всей системы.

В ходе вычислительного эксперимента было обнаружено, что чистота поверхности теплообмена имеет значительное воздействие на давление пара в конденсаторе.

Выполнен расчет оптимального срока очистки конденсатора. Рассмотрены способы очистки трубных пучков конденсатора. Даны рекомендации по очистки трубных пучков эксплуатационному персоналу. Рассмотрены различные способы проверки герметичности вакуумной системы турбоустановки для предотвращения попадания воздуха и других неконденсирующихся газов в конденсатор.

Пятый раздел содержит анализ рисков потери эффективности конденсационной установки ТЭЦ с разработкой дерева отказов. Рассчитаны значения событий вероятностей, приводящих к потери безопасности, исправности, работоспособности и эффективности.

Шестой раздел включает описание структуры программного обеспечения CU-код и даны рекомендации эксплуатационному персоналу.

Заключение обобщает полученные результаты исследования и основные выводы по диссертационной работе.

В приложениях приведены результаты обработки данных промышленного эксперимента, представлены: энергетическая характеристика турбины Т-110/120-130-5, патент на полезную модель, акты внедрения разработанных моделей и программ в учебный процесс, расчеты дерева событий.