

УДК 681.5:621.165

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭРОЗИИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

К.В. Дергачев

Брянский государственный технический университет, г. Брянск



Рассматриваются структура, функциональная схема работы и характеристики вычислительного комплекса, предназначенного для прогнозирования процесса эрозионного изнашивания рабочих лопаток турбин атомных электростанций.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и на протяжении всего жизненного цикла влажно-паровых турбин ставится задача обеспечения высокой степени их надежности, безопасности и экономичности.

В турбинах АЭС поток влажного пара оказывает сильное эрозионное воздействие на входные кромки рабочих лопаток 2-3 последних ступеней цилиндра низкого давления. Их изнашивание часто приводит к возникновению на отдельных режимах работы повышенных вибраций, которые могут повлечь за собой образование усталостных трещин и отрыв лопатки. Кроме этого, эрозия элементов проточной части, главным образом, рабочего облопачивания, влечет за собой существенное снижение экономических показателей влажно-паровых турбин.

Обеспечение безопасности, надежности и экономичности влажно-паровых турбоустановок осуществляется посредством проведения плановых остановов для их осмотра и ремонта. Чаще всего график осмотров новой турбины составляется на основе опыта эксплуатации и проведения замеров. Недостатками такого эмпирического подхода являются его низкая оперативность и недостаточно полный учет влияния режимных, конструкционных и материаловедческих особенностей вводимой в эксплуатацию турбины на процесс эрозионного изнашивания ее деталей, приводящий к нецелесообразным остановам или к увеличению стоимости ремонта, вследствие развившихся дефектов.

Повышение экономической эффективности эксплуатации при заданных параметрах надежности и безопасности, предъявляемых к объектам ядерных энергетических установок, может быть достигнуто за счет использования методов и средств оперативного контроля эрозионного состояния [1]. Наибольшей степенью оперативности и точности обладают диагностирующие и прогнозирующие системы.

Диагностирующие системы, рассмотренные в [2], позволяют по одному или нескольким косвенным признакам (газодинамические параметры, вибрация и др.) выявлять геометрические изменения входных кромок. Однако диагностические методы используются, в основном, для распознавания эрозионного состояния лопаточного аппарата в

текущий момент времени и не могут быть использованы на этапе проектирования турбины для расчета ее будущего эрозионного состояния. Прогнозирующие системы, в свою очередь, позволяют моделировать процесс эрозии, узнавать параметры износа лопатки в любой момент времени, планировать оптимальный график ремонтов и помогают подбирать безопасные режимы работы турбины. Достоверность и полнота результатов расчетов, производимых прогнозирующими системами, напрямую зависит от точности математических методов и моделей, выбранных для описания газодинамических и эрозионных процессов. Высокой точности и скорости расчетов в таких сложных вычислительных задачах можно достичь при помощи автоматизации процесса расчета на современных компьютерах.

Таким образом, наиболее предпочтительным средством контроля в целях повышения эффективности и надежности турбин АЭС является электронная система прогнозирования эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

К системам, моделирующим эрозионные процессы, предъявляются особые требования, обусловленные пространственно-временной и режимной неоднородностью процесса изнашивания поверхности материала. Случайный характер параметров ударного нагружения входных кромок капельным потоком делает необходимым проведение их дискретизации. Поверхность лопатки необходимо разбивать на микроплощадки, в пределах каждой из которых свойства материала и параметры нагружения считаются однородными. Спектр эрозионно опасных капель должен быть разделен на фракции, характеризующиеся средним диаметром капель. Среди многообразия режимов работы турбины нужно выделить несколько наиболее часто используемых; при этом весь расчетный временной отрезок работы турбины необходимо разбить на несколько более мелких. Для получения достоверных результатов расчета при моделировании процесса эрозионного изнашивания рабочих лопаток турбомашин дискретизация указанных параметров должна быть как можно более мелкомасштабной. Такой подход определяет высокие требования к скорости работы вычислительной системы и объему памяти необходимых для обработки и хранения массивов параметров эрозионно ударного воздействия. Несколько лет назад этим требованиям удовлетворяли, в основном, дорогостоящие супер-ЭВМ, стоимость которых была сравнима со стоимостью всего турбинного агрегата. Прогнозирующие системы, созданные в то время, для использования на более распространенных микроЭВМ отличались чрезмерным упрощением и неточностью модели износа, неудобным интерфейсом и низкой скоростью работы. Современные серийно выпускаемые компьютеры общедоступны; при этом они обладают достаточным быстродействием и объемом памяти для достоверного моделирования кинетики эрозионных процессов.

Ввиду этого актуальной представляется задача разработки алгоритмического, информационного и программного обеспечений необходимых для точного прогнозирования эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток с использованием средств современной вычислительной техники.

ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Разрабатываемая система должна выполнять следующие функции:

- удобный ввод и редактирование исходных данных по геометрии, материалам лопаток и газодинамике турбины;
- хранение исходной информации и результатов расчетов по всем типам рассчитанных ранее турбин в базах данных;

- подробный расчет геометрических характеристик лопатки и ее пространственную дискретизацию;
- моделирование движения парового потока и частиц эродента в межвенцовом зазоре;
- расчет кинетики эрозионного изнашивания входных кромок рабочих лопаток турбомашин;
- расчет количественных характеристик эрозионного повреждения лопаток за указанный промежуток времени;
- вывод результатов расчета в виде графических изображений, текста и таблиц на экран монитора.

Структурно-функциональная схема программы представлена на рис. 1.

АЛГОРИТМ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для прогнозирования эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток турбомашин необходимо выполнить следующие этапы.

- Ввод исходных данных:
 - ввод исходных газодинамических данных по турбине или выбор турбины, сведения о которой уже внесены в базы исходных данных системы (рис. 2);
 - ввод данных о геометрии рабочей лопатки или выбор данных из баз данных геометрических характеристик (геометрия может быть задана координатами точек или дугами окружностей образующими профили поперечных сечений лопатки);
 - ввод информации о параметрах и свойствах противозэрозионной защиты лопаток при помощи выбора данных из баз физических свойств материалов;
 - ввод данных о переменных режимах работы турбоагрегата и их относительной продолжительности.
- Моделирование движения капельных потоков и их взаимодействия с поверхностью рабочей лопатки:
 - проведение пространственной дискретизации эродируемой лопатки турбины и расчет ее геометрических характеристик;
 - моделирование движения парового потока и расчет его параметров;
 - моделирование формирования, движения и воздействия капельных потоков эродента на поверхность лопатки.
- Расчет количественных характеристик эрозионно усталостного повреждения с учетом эрозионно усталостных свойств материала.
- Вывод информации о прогнозируемом эрозионном состоянии лопатки.

В результате проведения пространственной дискретизации вся поверхность рабочей лопатки разбивается на микроплощадки. Координаты их центров рассчитываются при помощи интерполяции координат точек базовых профилей и сохраняются в базе геометрических данных. После этого на экран выводятся полученные промежуточные профили лопатки. В качестве интерполирующего алгоритма используется кубический сплайн.

Моделирование процесса расширения пара в турбинной ступени осуществляется на основе алгоритмов газодинамических расчетов, приведенных в [3]. Согласно данной методике кольцевое сечение проточной части разбивается на ряд тонких концентрических кольцевых слоев - струек. В каждом из них на основании газодинамических расчетов определяются параметры движения двухфазного рабочего тела. К их числу относятся действительные и относительные скорости движения пара, их углы входа в рабочий аппарат, влажность в межвенцовом зазоре, масса капельной влаги, достигающей рабочей лопатки и др. Совокупность данных параметров, рассчитанных для номинального и ряда дискретно заданных частичных режимов работы турбомашин, дает пол-

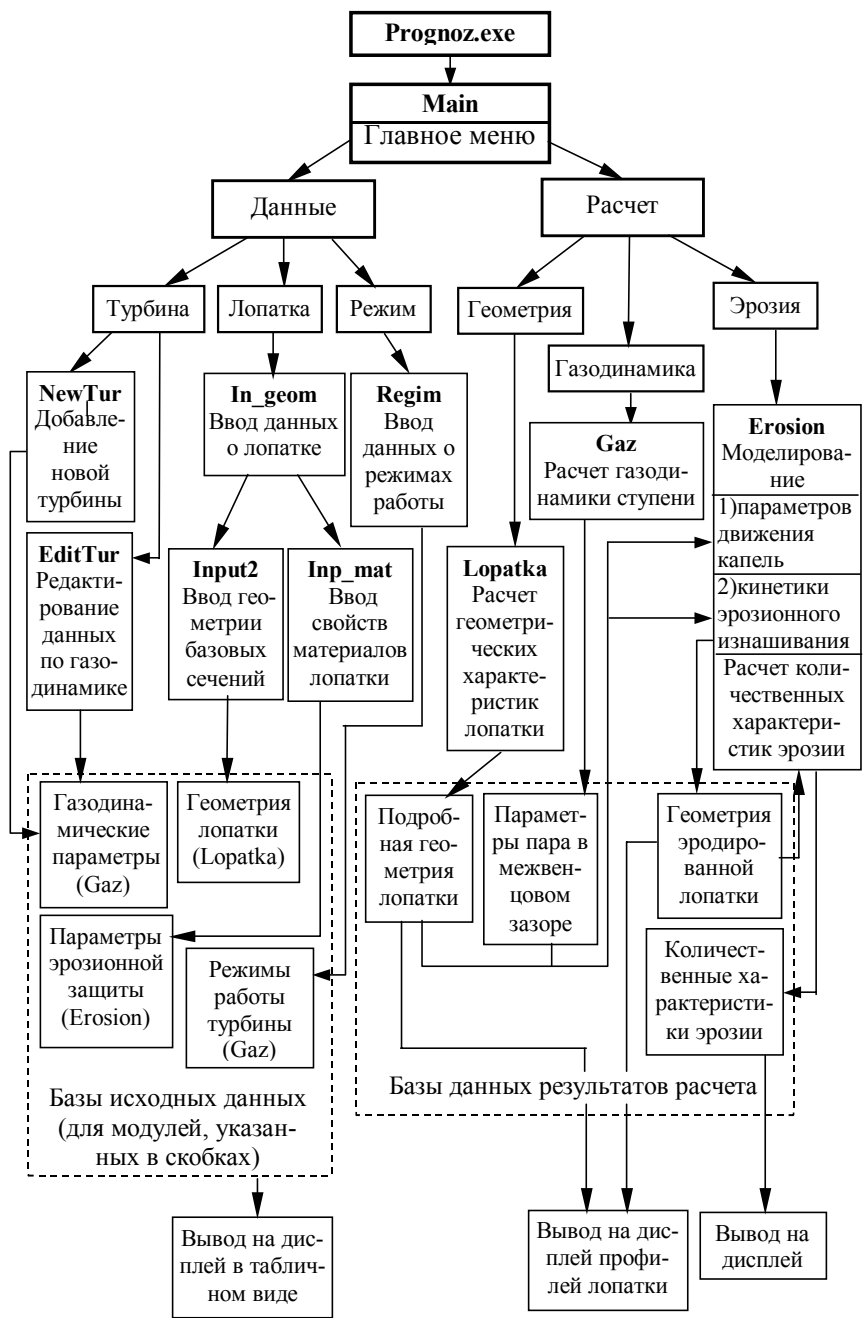


Рис. 1. Структурно-функциональная схема электронной системы прогнозирования

ную исходную информацию о газодинамическом состоянии рабочего тела в ступени.

После расчета газодинамики ступени выполняется построение эпюр распределения по поверхности эродирующих рабочих лопаток кинематических параметров ударного воздействия эрозионно опасных фракций капель, исходя из математической модели кинематики полидисперсного двухфазного потока частиц эродента в турбинной ступени.

Для определения диапазона радиусов эрозионно опасных капель оценивается

Ввод и редактирование исходных данных по газодинамике

Турбина:
 К. 300.240
 Число струек: 51
 Расход пара, кг/с: 76
 Частота вращения, 1/с: 50
 Число РП в ступени: 96
 Параметры пара перед ступеню на среднем диаметре:
 энтальпия (торсионная), кДж/кг: 2451.1
 давление (торсионная), МПа: 0.0137
 давление, МПа: 0.0126
 Давление за сопловой решеткой, МПа: 0.0095
 Давление за ступеню, МПа: 0.0034

Размеры:
 корневой диаметр, м: 1.8
 длина сопловой лопатки, м: 0.934
 длина рабочей лопатки, м: 0.96
 хорда сопловой лопатки, м: 0.25
 хорда рабочей лопатки, м: 0.18
 угол установки сопловой лопатки, град: 24.9
 межлопаточный зазор, м:
 корневой: 0.07 периферийный: 0.07

Коэффициенты:
 расхода сопловой решетки: 1.012
 расхода рабочей решетки: 1.013
 скорости сопловой решетки: 0.972
 скорости рабочей решетки: 0.983
 критическое отношение давлений: 0.57
 показатель изоэнтропы: 1.32

Информация о волокнах в ступенях:

N	Давление Р0, МПа	Кл. сепарации	Аэродинам. к.т.	Скорость
1	0.0572	0.1	1	0.9999
2	0.0249	0.1	1	0.970
3	0.0126	0.1	1	0.941

Изменить Добавить... Удалить Закрыть

Рис. 2. Окно ввода газодинамических данных

максимальный радиус капли в потоке кромочного следа за сопловой решеткой в каждой из струек по высоте лопатки. При расчете движения частиц жидкого эродента моделируется явление дробления капель газовым потоком. Количественно условие дробления характеризуется критерием Вебера, при достижении критической величины которого ($We_{кр}=14$) происходит распад эрозионно опасной капли.

Движение капли в кромочном следе описывается уравнением [4, с. 95]

$$\frac{dc'}{dt} = \frac{3}{8} \frac{C_x(c-c')|c-c'|}{\rho' v c' r_k}, \quad (1)$$

где c и c' – скорости кромочного следа и капли; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления капель; ρ' – плотность эродента; v – удельный объем пара в струйке; r_k – радиус капли.

Численно решая дифференциальное уравнение (1) методом Кутты-Мерсона, итерационно определяется максимальный радиус капли, не подвергшейся разрушению до столкновения с поверхностью рабочей лопатки. Одновременно рассчитываются абсолютные скорости движения капель различных фракций и из треугольника скоростей определяется относительная скорость и угол их входа в рабочий аппарат.

Для расчета количественных характеристик эрозии рабочих лопаток в системе используется математическая модель эрозионно усталостного повреждения материалов [5]. Она основана на гипотезе о том, что в основе механических видов эрозионного разрушения поверхности твердых тел лежит механизм многоциклового усталости, который приводит к накоплению в микрообъемах материала необратимых структурных изменений. Чтобы определить суммарное усталостное повреждение любой точки, лежащей на поверхности рабочей лопатки, в математической модели вычислительного комплекса используется линейная гипотеза суммирования эрозионных повреждений, которая позволяет связать время до начала разрушения с условиями эрозионного нагружения.

Суммарное усталостное повреждение слоя материала с единичной площадью поверхности за единицу времени от всех групп эрозионно опасных капель во всем диапазоне нагрузок турбины может быть найдено по формуле

$$D = N_{\varepsilon}^{-1} \int_0^{N_{max}} \tau(N) \int_{r_1}^{r_2} \left(\left(\frac{r_k}{W_R} \right)^{1,5} V_n' (V_R')^2 \right)^{m_{\varepsilon}} n(r_k) b^{-1} \cos \varphi \, dr_k \, dN, \quad (2)$$

где $\tau(N)$ – функция, определяющая долю работы турбины при нагрузке N по отношению к общему времени ее работы; W_R , $N_{\varepsilon 0}$, m_{ε} – эрозионно усталостные характеристики материала: пороговый эрозионный комплекс, абсцисса точки перелома кривой эрозии и показатель наклона левой ветви кривой эрозии соответственно; V_R' – скоростной эквивалент динамического предела выносливости; V_n' – нормальная составляющая скорости капли; $n(r_k)$ – функция распределения числа капель по радиусам (нормальное распределение); b – ширина полосы эрозионно опасного потока, достигающего одной входной кромки; φ – угол между нормалью к поверхности лопатки и направлением скорости падения капли; N_{max} – максимальная мощность, развиваемая турбиной; r_1 – радиус минимальных эрозионно опасных капель; r_2 – радиус максимальных капель, достигающих входной кромки.

При прогнозировании учитываются только эрозионно опасные фракции капель, т.е. фракции, для которых справедливо условие

$$V_n'^2 r_k \geq W_R. \quad (3)$$

Величины эрозионных свойств W_R , $N_{\varepsilon 0}$, m материала микроплощадки являются случайными вследствие статистической неоднородности материала поверхностного слоя лопатки. Распределения этих свойств являются нормальными, а их стандартные отклонения вычисляются по методу Монте-Карло.

Определив параметры каплеударного нагружения эрозионно опасными потоками капельной влаги и суммарное повреждение каждой микроплощадки поверхности рабочей лопатки, переходим к расчету длительности инкубационного периода каждой микроплощадки поверхности рабочей лопатки:

$$\tau_{\mu} = D^{-1}. \quad (4)$$

Скорости износа во втором (максимальном) и в третьем (установившемся) периодах зависят от эрозионно усталостных свойств материала лопатки, инвариантных по отношению к условиям каплеударного нагружения и от значения τ_{μ} . Для их нахождения в прогнозирующей системе использовались зависимости, приведенные в [5, 6].

Показатели процесса эрозии для каждой микроплощадки поверхности рабочей лопатки позволяют построить кинетические кривые износа (рис. 3). На основе композиции всего множества кинетических кривых определяется широкая номенклатура количественных характеристик эрозионного износа лопаток, в частности общий объем и масса изношенного материала, ширина зоны износа в любом расчетном сечении, глубина износа в каждой расчетной точке в произвольный момент времени, уменьшение хорды профиля и др. Вид эродированных профилей рабочей лопатки выводится на экран монитора (рис. 4).

Таким образом, на основании математического описания эрозии реализован моделирующий алгоритм, имитирующий процессы эрозионного разрушения.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Большинство известных в настоящее время систем моделирования эрозионного изнашивания созданы при помощи средств разработки для операционной системы MS DOS.

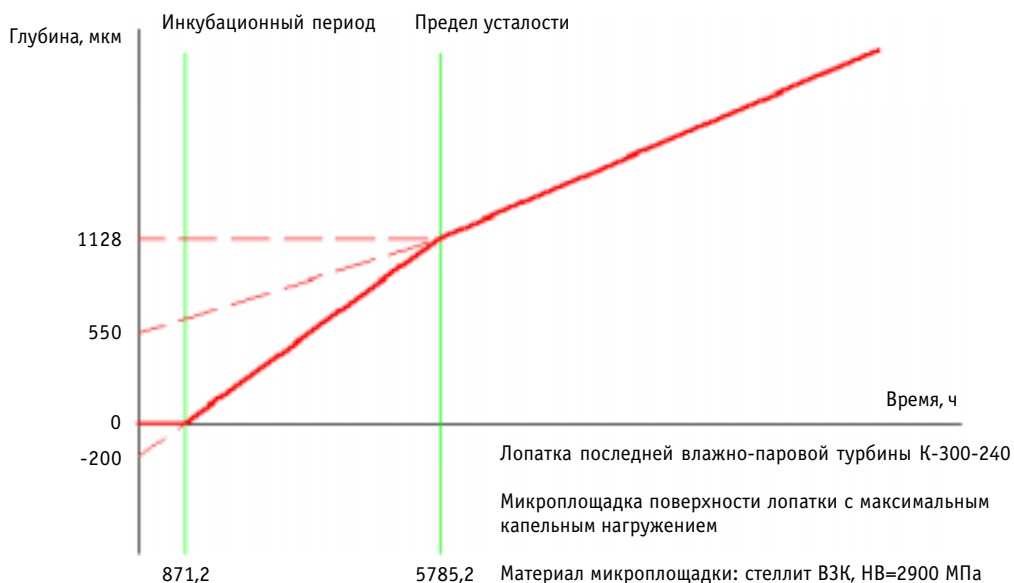


Рис. 3. Прогнозируемая кинетическая кривая эрозии

Вследствие того, что DOS реально позволяет использовать прикладным программам не более 1 Мб оперативной памяти, такие системы не способны обеспечить достаточную дискретизацию физических процессов и дают неудовлетворительную по точности информацию о кинетике эрозии. Такие вычислительные программы также характеризуются длительным процессом расчета по сравнению с системами для Windows, а также недостаточно удобным пользовательским интерфейсом.

Необходимый уровень дискретизации и повышение уровня удобства работы обеспечиваются разработкой прогнозирующего вычислительного комплекса, предназначенного для функционирования в системе Windows на современных персональных компьютерах.

В качестве среды разработки электронной системы прогнозирования была использована инструментальная среда разработки программ Borland Delphi 3 для Windows 9x, сочетающая в себе визуальные средства программирования и высокую скорость работы. Программы, разработанные в этой среде, позволяют преодолеть все названные выше недостатки систем для MS-DOS. Использование объектно-ориентированной системы Delphi и языка Object Pascal в качестве средства разработки прогнозирующего вычислительного комплекса позволило повысить точность расчетов за счет использования больших размерностей массивов и создать графический интуитивно понятный интерфейс, ориентированный на использование многоуровневого меню. Исходные, промежуточные и результирующие данные всех этапов расчета хранятся в реляционных базах данных Paradox, поэтому существует возможность накопления и анализа информации по процессу эрозии лопаточного аппарата многих типов турбомашин.

Система прогнозирования имеет иерархическую модульную структуру (рис. 1). Исполняемый файл Prognosz.exe вызывает центральный модуль системы (Main), управляющий главным меню вычислительного комплекса. Функции наполнения системы информацией, моделирования физических процессов и вывода результатов прогнозирования возложены на меню «Данные» и «Расчет». Остальные пункты главного меню, такие как «Помощь» и «Выход» являются вспомогательными.

В меню «Данные» содержатся пункты меню второго уровня, вызывающие исполнение модулей интерактивного ввода исходных данных. Газодинамические данные и гео-

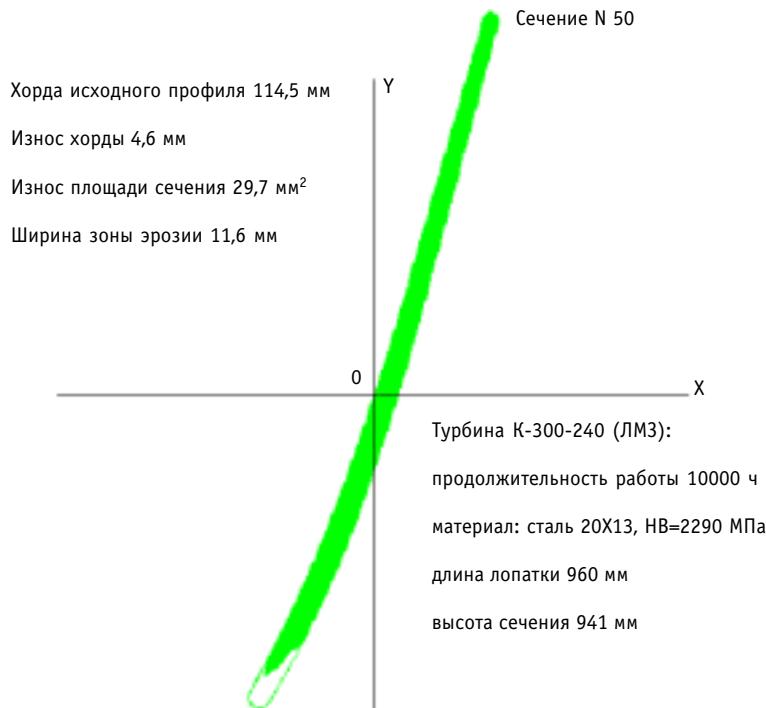


Рис. 4. Прогнозируемое состояние профиля рабочей лопатки

метрия проточной части турбины задаются в меню «Турбина» посредством модулей EditTur и NewTur. Интерфейсная часть модуля EditTur (рис. 2) позволяет выбрать турбину для моделирования и прогнозирования, отредактировать ее параметры и удалить ненужные данные. Если необходимой для моделирования турбины нет в списке, то ее можно в него добавить при помощи модуля NewTur. Геометрия основных сечений рабочей лопатки и параметры эрозионной защиты задаются посредством меню «Лопатка». Данный пункт активизирует модуль In_geom, содержащий информацию по параметрам микроплощадок. Из него, в свою очередь, может быть вызван модуль Input2, отвечающий за наполнение и редактирование баз геометрических характеристик сечений, заданных по точкам или дугами окружностей, и модуль Inp_mat, содержащий информацию о материалах лопаток турбин и их эрозионной защите. Режимы работы турбины задаются в меню «Режим», использующем процедуры модуля Regim. В этом окне вводится расход пара и параметры, известные за последней ступенью (давление, энтальпия, температура, степень сухости), и частота вращения ротора.

Меню «Расчет» содержит подменю, активизирующие исполнение модулей расчетного характера. Пункт меню «Геометрия» вызывает процедуры модуля Lopatka, производящие подробную пространственную дискретизацию поверхности рабочей лопатки, на основе данных, полученных из модуля Input2, вывод полученных профилей на экран и сохранение найденных координат микроплощадок в базе результатов Rezgeom2.db. Продолжительность расчета по пункту «Геометрия» составляет 40-50% общего времени всех расчетов.

Меню «Газодинамика» выполняет процедуры газодинамических расчетов турбинной ступени, находящиеся в модуле Gaz. Данный модуль рассчитывает параметры пара перед рабочим колесом и выводит их в табличном виде. Результаты газодинамических расчетов для каждой струйки заносятся в базу Rez_nom.db – для номинального режи-

ма и в Rez_var.db – для переменного режима работы турбины. Удельная продолжительность газодинамических расчетов не превышает 10%.

Пункт «Эрозия» исполняет код модуля Erosion, состоящий из процедур моделирования параметров движения капель, кинетики эрозионного изнашивания и расчета количественных характеристик эрозии. При моделировании используются данные из базы эрозионно-усталостных характеристик материала лопатки, результатов пространственной дискретизации и результатов расчета газодинамики. Координаты микроплощадок эродированного профиля после прогнозирования сохраняются в базе Rez_eros.db. Указанные процедуры исполняются приблизительно за 40% общего времени расчетов.

Большое количество записей в базах результатов Rezgeom2.db и Rez_eros.db во многом определяет размер свободного дискового пространства, необходимого для установки прогнозирующей системы. Для записи координат микроплощадок каждой, введенной в систему, лопатки на диске необходимо около 2 Мб.

Процессы ввода исходных данных, проведения расчетов и обработки их результатов облегчены интуитивно понятной системой всплывающих подсказок. Такие подсказки существуют для всех таблиц, в которых производится редактирование данных, для таблиц результатов и для кнопок, выполняющих функции редактирования и расчета. Они содержат в себе подробную информацию о полях таблиц, разъяснения по функциям кнопок и др.

Использование графического интерфейса, объем баз данных по эрозионному износу и необходимость высокой скорости и точности расчетов определяют основные требования к компьютеру: процессор Intel Pentium 200, оперативная память 32 Мб, свободное дисковое пространство 30 Мб, видеоадаптер и монитор SVGA (800x600), мышь, операционная среда Windows 95/98, система для работы с базами данных DataBase Desktop7.

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Электронная система прогнозирования прошла тестовые испытания по расчету эрозионного состояния входных кромок рабочих лопаток последней ступени цилиндра низкого давления турбины К300-240 ЛМЗ.

Полученные в результате газодинамических расчетов турбин различных типоразмеров параметры пара были проверены по hs-диаграммам. Отклонения составили менее 3%. Расчет скоростей и направлений потоков пара для ступеней судовых и конденсационных паровых турбин электростанций показал приемлемое соответствие данным, приведенным в [3, 7]. Максимальные размеры и относительные скорости эрозионно опасных капель потока, полученные в моделях последних влажно-паровых ступеней

Таблица 1

Сравнительные данные по эрозии рабочих лопаток последних турбинных ступеней

Турбина	Время, тыс. ч.	Среднестатистическая ширина зоны эрозии, мм		Среднестатистический износ хорды профиля, мм	
		реальная	расчетная	реальный	расчетный
К-300-240 ЛМЗ Сырдарьинской ГРЭС	20	12,3	12,1	5,5	5,7
К-300-240 ЛМЗ Костромской ГРЭС	55	24,9	24,6	14,3	14,6
Турбина №2 атомного ледокола «Ленин», (закалка ТВЧ стали 12Х13)	30	4,8	5,0	0,34	0,41
Турбина №3 атомного ледокола «Ленин», (хромовое покрытие лопаток)	20	2,8	3,1	0,90	1,05

различных турбин, совпадают с экспериментальными данными [7-9].

Итоговым результатом расчета являются прогнозируемые геометрические характеристики эродируемых профилей рабочих лопаток. Они достаточно точно совпадают (табл. 1) со среднестатистическими данными замеров, приведенных в работах [7, 9].

Расчетные прогнозы эрозионного состояния турбинных ступеней подтвердили экспериментальные данные о влиянии режимных, конструкционных и материаловедческих параметров ступени на ее эрозию. В частности, было проверено, что увеличение осевого зазора снижает эрозионный износ входных кромок рабочего аппарата.

Результаты тестирования системы и приемлемое совпадение прогнозов с экспериментом свидетельствуют о достоверности реализованных математических моделей и методов.

ВЫВОД

Наиболее предпочтительным средством автоматизированного контроля эрозионного состояния деталей турбин АЭС является применение электронных систем прогнозирования.

В данной работе решена задача разработки алгоритмического и программного обеспечения для прогнозирования эрозионного износа входных кромок рабочих лопаток. Программная реализация системы прогнозирования обеспечивает удобный ввод и редактирование исходных данных, хранение информации в базах данных, расчет геометрических характеристик лопатки, моделирование движения парового потока и частиц эродента, расчет кинетики эрозионного изнашивания и количественных характеристик эрозионного повреждения рабочих лопаток, вывод результатов расчета на экран монитора и на печать.

Удовлетворительное соответствие экспериментальным данным характеристик и возможностей электронной прогнозирующей системы свидетельствуют о целесообразности ее внедрения для прогнозирования технического состояния влажно-паровых турбомашин АЭС. Использование такой системы при проектировании и эксплуатации турбин позволит избежать необоснованных простоев и обеспечить высокую степень их надежности.

Литература

1. Хаимов В.А., Храбров П.В., Марченко Ю.А., Котляр О.Е. Эрозионные процессы лопаточного аппарата и задачи диагностического контроля // Труды ЦКТИ. – 1992. – Вып. 273. – С. 84-92.
2. Жуковский Г.В., Марченко Ю.А., Терентьев И.К. Тепловые расчеты паровых и газовых турбин с помощью ЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1983. – 255 с.
3. Паровые и газовые турбины: Сборник задач / Под ред. Б.М. Трояновского, Г.С. Самойловича – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 235 с.
4. Носовицкий А.И., Шпензлер Г.Г. Газодинамика влажно-паровых турбинных ступеней. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
5. Фаддеев И.П., Лагерева А.В. Прогнозирование процесса эрозии рабочих лопаток судовых турбин // Судостроение. – 1989. – № 5. – С. 18-20.
6. Stanisa B., Povarov O., Rizenkov V. A. Osnovne zakonitosti erozije materijala lopatica parnih turbina pri sudaranju s vodenim kapljicama. Процесс эрозии материала лопаток паровых турбин при ударном воздействии капель воды // Strojarstvo. – 1985. – Т. 27. – № 6. – С. 313-318. (серб.)
7. Мокравцов М.В. Эрозионный износ рабочих лопаток влажно-паровых ступеней ЧНД турбин и перспективные методы его снижения: Дис. к.т.н. – С-Пб.: СПбГТУ, 1991.

8. Казак М.А., Альфер Б.В., Фаддеев И.П., Радик С.В. Прогнозирование эрозии лопаток судовых турбин низкого давления//Судостроение. - 1975. - № 4. - С. 18-20.

9. Казак М.А., Фаддеев И.П. Состояние проточной части турбин судовых ГТА в процессе длительной эксплуатации//Энергомашиностроение. - 1974. - № 10. - С. 7-9.

Поступила в редакцию 30.05.2001

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 681.5:621.165

Electronic System of Erosion Forecasting of Turbine Rotor Blade of Nuclear Power Plants \ K.V. Dergachev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 10 pages, 4 illustrations, 1 table. - References - 9 titles.

The structure, functional scheme and characteristics of calculating complex intended for prediction of erosion of NPP turbine rotor blade are considered in this paper.

УДК 681.332

Designing of Ultrasonic Defectoscop SK26 Core on the basis of Multiprocessor System \ S.V. Michailov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 4 tables. - References - 5 titles

Method of the ultrasonic defectoscop SK26 core designing by way of multiprocessor system on the basis of digital signal processors ADSP-21XX has been presented. Local bus classification of multiprocessor system has been proposed.

УДК 621.039.586 : 536.42

Calculation Model of Pin Meltdown subject to Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident / G.N. Vlasichev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 6 illustrations, 1 table. - References, 10 titles.

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. Meltdown times of pin cladding and fuel on height of separate fuel pin, complete or partial blocking of the channel by a freezing material, and also repeated meltdown of the solidified layer are determined as a result of calculations. Testing of the developed programs of account of fuel pin melting and molten cladding moving TRAMS-TWEL and MOTE according to numerical results of techniques similar used in given programs is executed. The accounts of fuel pin cladding melting, cladding melt moving and freezing in not heated sections, taking place above and below active part of FFTF pin, and also in the most active part are executed. As a whole, received as a result of accounts a configuration, the lengths of layers from the solidified steel are higher and below heated site satisfactorily correspond to the data of R-5 experiment on TREAT reactor.

УДК 621.311:621.039

Temporary Closing-down of Condensate-feed Channel and Steam Generators of Power Units with the using of Octadecylamine \ E.B. Gromov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 3 tables. - References - 4 titles.

Results of development, improvement and assay of technology of the temporary closing-down of heat-and-power engineering equipment with using of film-forming amines and, in particular, octadecylamine

УДК 621.039.519

Measurement of radionuclide yields produced in 2.6 GeV proton irradiated nat-W \ Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, B.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, C.V. Kvasova, D.V. Fischenko; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 13 pages, 2 illustrations, 2 table. - References - 23 titles.

Radionuclide yields are measured in natural tungsten thin target irradiated with 2.6 GeV protons. The measurements were carried out using direct gamma-spectrometry of samples irradiated via U10 ITEP synchrotron. In total, 129 yields were defined, including 10 independent, 9 independent