

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Гришин Микола Миколайович

УДК 621.165: 539.3+621.311.25: 658.3

**ПРОГНОЗУВАННЯ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ  
МІЦНОСТІ ТУРБІН ДЛЯ БЕЗПЕКИ АЕС**

Спеціальність 05.02.09. - динаміка та міцність машин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Відкритому акціонерному товаристві “Турбоатом” Міністерства промислової політики України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук,  
Левченко Євгеній Володимирович,  
Відкрите акціонерне товариство “Турбоатом”,  
м. Харків, Головний конструктор парових та газових турбін.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Жовдак Валерій Олексійович,  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,  
професор кафедри динаміки та міцності машин;

кандидат технічних наук,  
Зайцев Борис Пилипович,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,  
старший науковий співробітник.

Провідна установа: Національний авіаційний університет, Науково-  
дослідницький інститут механіки швидкоплинних  
процесів, МОН України, м. Київ.

Захист відбудеться “ 22” жовтня 2003 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д  
64. 050. 10 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”  
за адресою:

61002, м Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету  
“Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2003 р.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 64. 050. 10  
Бортовой

В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У теперішній час особлива увага фахівців у галузі проектування, будівництва та експлуатації АЕС надається проблемі створення нових науково обґрунтованих методів прогнозування їх безпеки та забезпечення необхідного рівня конструктивної міцності значного ряду відповідальних об'єктів АЕС, зокрема, роторів турбін. Існуючі підходи й методи до прогнозування безпеки АЕС не завжди адекватно відповідають новим вимогам, що містяться у визначальних документах, із їх безпечної експлуатації. Практично залишаються не розробленими методи прогнозування ушкоджень відповідальних об'єктів АЕС при руйнуванні турбін, що не дозволяє прийняти обґрунтоване рішення для безпечного їхнього розміщення на АЕС. Ротор турбіни є важливим з погляду безпеки АЕС, у зв'язку із чим актуальними залишаються питання забезпечення його міцності. Це стосується дискових роторів зварної конструкції, які одержали поширення завдяки відомим перевагам у порівнянні з цільнокованими роторами й роторами з насадними дисками. Для зварних роторів турбін, у тому числі й вироблених ВАТ “Турбоатом”, необхідні нові підходи до комплексної оцінки їхньої конструктивної міцності, засновані на даних про технологію зварювання й схильності зварних швів до крихких руйнувань, що дозволить виробити науково обґрунтовані рекомендації до роторів з підвищеною міцністю. З урахуванням сучасних вимог до безпеки АЕС, необхідністю у науково обґрунтованих оцінках безпечного розміщення важливих об'єктів на них і постійного удосконалювання конструкцій турбін, проблема розробки нових, науково обґрунтованих методів прогнозування безпеки АЕС, а також методик підвищення конструктивної міцності зварних роторів турбін, вироблених ВАТ “Турбоатом”, є актуальною в науковому та практичному відношеннях.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у ВАТ “Турбоатом” за темами, координуваним Державною адміністрацією ядерного регулювання Мінекоресурсів України відповідно до діючого в Україні з 1995 року розпорядчого документа “Вимоги до змісту звіту по аналізу безпеки діючих на Україні енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР”, розробленого Національною атомною енергогенеруючою компанією, а також при виконанні госпдоговірної НДР “Визначення характеристик і зони впливу предметів, що летять, при гіпотетичному руйнуванні турбіни К-220-44 блоку №1 Рівненської АЕС” у період з 06.02.2001 по 15.10.2002, де автор був відповідальним виконавцем. Робота зв'язана з темами програм підприємства, у межах ФВР, які були спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності зварних роторів парових турбін і виконувались з 1983 року у ВАТ “Турбоатом”.

**Мета й задачі дослідження.** Метою роботи є розробка науково обґрунтованих методів прогнозування безпеки АЕС при руйнуванні турбіни для прийняття обґрунтованих рішень із безпечного розміщенню важливих об'єктів на АЕС і комплексної методики розрахунків на міцність елементів конструкцій турбомашин для підвищення міцності та довговічності конструкцій зварних роторів парових турбін, вироблених ВАТ “Турбоатом”.

Для реалізації сформульованої мети вирішено наступні задачі:

- здійснено систематичний аналіз ймовірних руйнувань конструктивних елементів парової турбіни для визначення ступеню небезпеки за ушкодженням з руйнуванням осколками, що вилітають, важливих для безпеки АЕС об'єктів і визначено елемент турбіни - зварний ротор НТ, здатний при руйнуванні призвести до важкої аварії;

- запропоновано на основі розрахункових і узагальнених досвідчених даних найбільш ймовірні характеристики осколків, що летять, і математичні моделі ймовірного опису польоту осколків;

- надано оцінки ймовірності небезпечних руйнувань конструктивних елементів ротора парової турбіни і знайдено для них ймовірності вильоту небезпечних осколків у площині обертання, а також при відхиленні траєкторії вильоту з цієї площини;

- визначено зони вильоту й падіння осколків, ймовірності влучення їх у важливі для безпеки АЕС об'єкти, що дозволяє запропонувати науково обґрунтовані рішення для їхнього розміщення на території АЕС;

- розроблено методики комплексної оцінки конструктивної міцності зварних роторів парових турбін, засновані на даних про експлуатаційні режими, технологію зварювання і схильності зварних роторів до крихких руйнувань;

- запропоновано науково обґрунтовані рекомендації до підвищення міцності та довговічності зварних роторів виробництва ВАТ “Турбоатом”.

*Об'єктами дослідження* є: зварні конструкції роторів парових турбін в експлуатаційних режимах при вичерпанні їхньої несучої здатності; осколки турбін, що летять у важливі для безпеки АЕС об'єкти та ушкоджують їх.

*Предмет дослідження* включає розгляд траєкторій осколків роторів турбін при їхньому руйнуванні для визначення зон падіння та влучення осколків в об'єкти АЕС, методи прогнозування безпеки АЕС і методики оцінки конструктивної міцності зварних роторів парових турбін виробництва ВАТ “Турбоатом”.

*Методи дослідження* складаються з методів теорії ймовірності та математичної статистики, аналітичних і чисельних методів рішення початкових задач для аналізу руху вільних матеріальних точок, методів скінченних елементів, чисельних методів для програмної реалізації на ПЕОМ розрахунків на міцність і жорсткість складних зварних конструкцій обертових роторів,

методів фотопружності для експериментальних досліджень і методів ультразвукового контролю зварних швів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Виконані в роботі дослідження дозволили одержати нові наукові результати:

- уперше запропоновано методика прогнозування безпеки АЕС із імовірності поразки її об'єктів осколками турбіни для визначення зон вильоту та ймовірності їхнього влучення у важливі для безпеки АЕС об'єкти, яка заснована на статистичному аналізі руйнувань турбіни, розрахункових і узагальнених досвідчених даних про найбільш ймовірні характеристики осколків, що вилітають;

- уперше надано оцінки ймовірності небезпечних руйнувань конструктивних елементів ротора парової турбіни і визначено ймовірності вильоту небезпечних осколків у площині обертання та при відхиленні траєкторії вильоту з цієї площини;

- одержали подальший розвиток методи розрахунку на міцність роторів турбін на основі запропонованої у роботі нової методики комплексної оцінки конструктивної міцності зварних роторів парових турбін, у якій враховано дані про експлуатаційні режими, технологію зварювання і крихкого руйнування зварних роторів;

- запропоновано нові, науково обгрунтовані рекомендації з підвищення міцності та довговічності зварних роторів виробництва ВАТ “Турбоатом”, які практично використані на цьому підприємстві.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створена і науково обгрунтована методика до прогнозування безпеки АЕС за даними про оцінки ймовірності руйнування з вильотом осколків ротора низького тиску парової турбіни, яка дозволяє виконати роботи, що обумовлені в розпорядчому документі “Вимоги до змісту звіту по аналізу безпеки діючих на Україні енергоблоків АЕС із реакторами типу ВВЕР”, та обгрунтувати безпеку енергоблоків АЕС. Дані про зони вильоту, падіння, влучення осколків у важливі для безпеки об'єкти, розташовані на території АЕС, можна використовувати для прийняття й виконання додаткових заходів щодо захисту цих об'єктів на діючих станціях.

Отримані результати роботи використані у ВАТ “Київський науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут “Енергопроект” для виконання робіт, визначених Законом України “Про використання ядерної енергії і радіаційної безпеки” (стаття 33) і Наказом Держкоматому №386 від 27.11.95р. Методика комплексної оцінки конструктивної міцності зварних конструкцій роторів парових турбін застосована для вироблення заходів щодо підвищення міцності роторів турбін, вироблених у ВАТ “Турбоатом”. Результати роботи впроваджуються й використовуються у ВАТ “Турбоатом” при проектуванні зварних роторів парових турбін.

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертаційної роботи, які отримані особисто здобувачем, містять наступне. Створено методи щодо прогнозування безпеки АЕС при руйнуванні зварних роторів парових турбін по ймовірності влучення осколків у важливі об'єкти АЕС. Розроблено методику комплексної оцінки конструктивної міцності зварних роторів парових турбін, на підставі якої запропоновано шляхи щодо підвищення міцності роторів за рахунок забезпечення такого рівня напруження у корні шва, коли у циклі навантаження не відбувається “розкриття” і зростання дефектів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи обговорювалися на науково-технічних конференціях: “Методы и модели в системах автоматизированного проектирования энергетических установок” (Харьков, 1979), “Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в системах их автоматического проектирования” (Харьков, 1985), “Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования” (Харьков, 1991), “Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов”, “Проблемы ресурсо- и природосбережения в энергетике” (Харьков, 1994), “Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования” (Харьков, 1997). Результати роботи доповідалися також на наукових семінарах кафедр “Теоретична механіка” (керівник - проф. Морачковський О.К.) та “Динаміка та міцність машин” (керівник - проф. Львов Г.І.) НТУ “ХПІ” протягом 2000 - 2003 рр.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, із них 4 статті у виданнях, обумовлених переліком ВАК України, 6 - у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій, отримано 1 авторське посвідчення і 2 патенти України.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 185 сторінок, 58 ілюстрацій на 47 сторінках, 12 ілюстрацій по тексту; 10 таблиць на 8 сторінках; 6 додатків на 20 сторінках; 82 найменувань використаних літературних джерел на 8 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 102 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** надано загальну характеристику роботи, що містить актуальність, наукову новизну та практичну цінність результатів дисертації,

визначено мету та задачі досліджень, наведено кваліфікаційні ознаки дисертації.

**У першому розділі** на підставі огляду джерел, що існують у літературі та у вітчизняній і світовій практиці, надано оцінку стану щодо проблеми прогнозування безпеки найбільш важливих об'єктів АЕС та вирішення завдань по забезпеченню необхідного рівня конструктивної міцності роторів турбін. Існуючі підходи й методи до прогнозування безпеки АЕС не завжди адекватно відповідають новим вимогам, обумовленим у визначальних документах із безпечної експлуатації АЕС; практично залишаються не розробленими методи прогнозування влучення у відповідальні об'єкти АЕС осколків, що вилітають при руйнуванні турбін. Це не дозволяє прийняти обґрунтоване рішення для безпечного розміщення об'єктів на АЕС. Не менш важливими є питання забезпечення міцності дискових роторів зварної конструкції, які розповсюджені завдяки відомим перевагам у порівнянні з цільнокованими роторами й роторами з насадними дисками. Для зварних роторів турбін необхідні нові підходи до комплексної оцінки їхньої конструктивної міцності, науково обґрунтовані рекомендації щодо виробництва роторів з підвищеною міцністю, що в значній мірі вплине на безпеку АЕС.

**У другому розділі** запропоновано методика прогнозування безпеки АЕС із імовірності поразки її об'єктів осколками, що вилітають при руйнуванні турбіни. Цю ймовірність  $p$ , з розрахунку на один об'єкт у рік, представлено добутком трьох ймовірностей:  $p_1$  - руйнування турбіни з вильотом одного чи декількох осколків,  $p_2$  - влучення у важливий об'єкт АЕС хоча б одного осколку,  $p_3$  - ушкодження чи руйнування об'єкту АЕС:

$$p = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3. \quad (1)$$

Після визначення ймовірності поразки об'єктів АЕС осколками турбіни  $p$ , можна здійснити захисні заходи. Згідно з виразом (1), ймовірність поразки важливого об'єкта АЕС осколками турбіни, що вилітають, можна знизити до значення, яке нижче гранично припустимого. Захисні заходи важливих для безпеки АЕС об'єктів здійснюються у трьох напрямках: зниженням значення  $p_1$ , за рахунок підвищення надійності потенційно небезпечних елементів парової турбіни; зниженням значення  $p_2$ , шляхом розміщення важливих об'єктів на території АЕС по можливості у безпечному місці; виконанням фізичного захисту важливих об'єктів, наприклад, зведенням захисних бетонних стін, що знизить значення  $p_3$ .

Через малу кількість руйнувань турбін складніше піддається достовірному визначенню ймовірність руйнування елементів турбіни  $p_1$ .

Для визначення цієї ймовірності у роботі виконано аналіз поломок і



руйнувань елементів турбін за статистичними даними, які накопичені на закордонних і вітчизняних електростанціях. Показано, що до важкої аварії з боку турбіни практично можуть призвести осколки, що летять, від працюючого турбогенератора, здатні механічно зашкодити важливі для безпеки системи й елементи АЕС. До таких осколків з усього турбінного устаткування можна віднести тільки осколки внаслідок руйнування обертових роторів. Найбільшу ймовірність руйнування, викликаного небезпечними осколками, що вилітають, має ротор низького тиску парової турбіни. Таким чином, зроблено висновок: вихідною подією важкої аварії на АЕС із боку турбінного устаткування можна вважати крихке руйнування роторів ЦНТ при підвищених швидкостях обертання з усередненою величиною 3300 об/хв для швидкохідних машин і 1650 об/хв – для тихохідних. Даних про руйнування інших елементів турбіни з вильотом небезпечних осколків за межі турбіни у ВАТ “Турбоатом” немає. Далі проблему прогнозування безпеки АЕС сфокусовано на рішенні задачі визначення ймовірності руйнування обертових роторів турбоагрегатів, насамперед, роторів ЦНТ, через їхнє крихке руйнування при штатному чи аварійному закиді обертань. Як середню величину таких закидів від номінальної швидкості обертання за статистикою прийнято  $\sim 10\%$ . Надалі приймалась, з найбільш ймовірних, найменша величина швидкості обертання роторів при руйнуванні, що при прогнозуванні безпеки АЕС виправдано доданням деякого завищення небезпеки за оцінкою ймовірності руйнування. З досвіду експлуатації випливає, що дефекти при втомному зростанні не призводили до руйнування роторів, а при рості вібрації валопроводу турбоагрегати зупинялися.

Розглянуто методику визначення ймовірності руйнування елементів турбіни  $p_1$ , запропоновану в роботі. Експлуатацію одного з елементів турбіни розглянутого класу протягом одного року прийнято за “іспит”, а експлуатацію елемента турбіни протягом середнього часу наробітку  $n$  років прийнято такою, що відбувається щорічно в ідентичних умовах. Експлуатація  $m$  однотипних елементів турбомашин розглянутого класу протягом  $n$  років, дозволяє визначити загальне число “іспитів”:  $N = m \cdot n$ . Події, що відповідають руйнуванню ротора з вильотом осколків, віднесені до малої ймовірності, а досвідчені дані для статистичної оцінки ймовірності руйнування  $p_1$  використано для визначення довірчої ймовірності. Ймовірність руйнування елемента турбіни  $p_1$  приблизно визначено довірчим інтервалом  $p^- \leq p_1 \leq p^+$ , межі якого є функціями, залежними від кількості “іспитів”  $N$  і довірчої ймовірності  $\beta$ . У роботі використано досвідчені дані з тривалої експлуатації турбін без руйнувань та застосовано метод побудови довірчого інтервалу, заснованого на відомому в теорії ймовірності законі біноміального розподілу ймовірності появи події:

$$p_{f,N} = C_N^f \cdot p^f \cdot q^{N-f}, \quad q = 1 - p, \quad (2)$$

де  $f$  – число подій, що з'явилися;  $N$  – число виконаних незалежних досвідів;  $C_N^f$  – число комбінацій  $p^f \cdot q^{N-f}$ .

При відсутності руйнувань елемента турбіни ліву границю довірчого інтервалу для ймовірності руйнування природньо прийняти рівною нулю ( $p^- = 0$ ), а праву границю, як впливає з формули (2) представити функцією від загальної кількості “іспитів”  $N$  і довірчої ймовірності  $\beta$ :

$$p^+(1) = 1 - \sqrt[N]{1 - \beta} \quad (3)$$

Таким чином, задачу визначення ймовірності руйнування елементів турбін зведено до визначення для неї довірчого інтервалу.

Чисельна оцінка ймовірності  $p_1$  руйнування ротора парової турбіни, із розрахунку на рік, отримана представленою у цьому розділі методикою. У розрахунках застосовано досвідчені дані для зварних роторів ЦНТ двох основних типів турбін К-1000-60/1500 і К-220-44, які експлуатуються в Україні, та статистичні дані про експлуатацію роторів подібної конструкції. Усього прийнято дані для 12 типів турбін із зварними роторами в кількості 491 шт., які експлуатуються із середнім наробітком 25 років на один ротор. Значення правої границі  $p^+$  довірчого інтервалу ймовірності руйнування роторів у залежності від величини довірчої ймовірності  $\beta$  наведені у табл. 1.

Таблиця 1

$\beta$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
$p^+ \cdot 10^{+5}$	0	0,86	1,8	2,9	4,2	5,6	7,5	9,8	13	19	24	38

Аналіз розрахункових даних, які отримані в роботі, дозволив зробити висновок про те, що з довірчою ймовірністю 0.9 ймовірність руйнування хоча б одного зварного ротора на рік знаходиться у довірчому інтервалі  $[0, 1.9 \cdot 10^{-4}]$ . Середнє значення довірчого інтервалу  $0.95 \cdot 10^{-4}$  прийнято за ймовірність руйнування зварного ротора на один рік при подальшій експлуатації. Значення вихідної події  $0.95 \cdot 10^{-4}$  перевищує величину  $1 \cdot 10^{-6}$ , що за вимогами нормативно-технічної документації не дозволяє виключити з подальшого розгляду питання розвитку аварії на АЕС при можливому руйнуванні зварного ротора парової турбіни.

Надано обґрунтування щодо вибору характеристик осколків, які вилітають. На підставі тривалого досвіду експлуатації турбін, експериментальних досліджень розгінних іспитів та упругопластичних розрахунків методом СЕ на міцність зварних роторів, визначені найбільш небезпечні, із найбільш

ймовірних, характеристики (маса, форма, швидкості вильоту і польоту) осколків при гіпотетичному руйнуванні зварного ротора (рис. 1).

Рис. 1. Найбільш небезпечний осколок масою ~1.5 т зруйнованого ротора турбіни К-220-44-3

Визначення ймовірності  $p_2$  влучення осколка у заданий об'єкт ґрунтується на застосуванні апарату та методів теорії ймовірностей. Для цього використано теоретичні моделі, досвідні дані експлуатації турбін, зовнішньо-балістичні характеристики осколків, які необхідні для визначення ймовірності ушкодження чи руйнування об'єктів у зонах падіння осколків. З різних причин і, насамперед, через несиметричний розрив дисків турбіни, осколки можуть вилітати не тільки в площині обертання дисків, а й з деяким відхиленням від неї. Зона падіння осколку визначається кутом  $\alpha$ :

$$\alpha = \arccos \left\{ \frac{\cos \theta \cdot \cos \varphi}{\sin [\arccos(\sin \theta \cdot \cos \varphi)]} \right\} = \arctg \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \theta}, \quad (4)$$

де  $\theta$ ,  $\varphi$  - кути вильоту осколків, які визначені у системах відліку в площині обертання диска і при відхиленні цієї площини.

Рівність (4) разом із координатами падіння осколків

$$x = \frac{1}{g} v_0^2 \cdot \sin 2\theta \cdot \cos^2 \varphi, \quad z = \frac{1}{g} v_0^2 \cdot \sin \theta \cdot \sin 2\varphi \quad (5)$$

є вихідними при визначенні зони їх падіння. Для визначення ймовірності  $p_2$  влучення осколка в об'єкт рівняння траєкторії польоту записані відносно функції, яка залежить від кута нахилу лінії, що з'єднує центр обертання диска з центром ваги осколка  $\gamma$ .

Далі для точки простору  $A(x,y,z)$ , щільності ймовірностей  $p(x,y)$ ,  $p(z,y)$ ,  $p(x,z)$  знайдено у залежності від щільності ймовірностей вильоту осколка в окружному  $p(\gamma)$  і бічному  $p(\varphi)$  напрямках:

$$p(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = p(\gamma) \cdot p(\varphi) \left[ \begin{array}{c|c} \frac{\partial \gamma_1}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \gamma_1}{\partial \mathbf{z}} \\ \hline \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{z}} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c|c} \frac{\partial \gamma_2}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \gamma_2}{\partial \mathbf{z}} \\ \hline \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{z}} \end{array} \right] p(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = p(\gamma) \cdot p(\varphi) \left[ \begin{array}{c|c} \frac{\partial \gamma_1}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \gamma_1}{\partial \mathbf{y}} \\ \hline \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{y}} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c|c} \frac{\partial \gamma_2}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \gamma_2}{\partial \mathbf{y}} \\ \hline \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{y}} \end{array} \right] \quad (6)$$

$$p(\mathbf{z}, \mathbf{y}) = p(\gamma) \cdot p(\varphi) \left[ \begin{array}{c|c} \frac{\partial \gamma_1}{\partial \mathbf{z}} & \frac{\partial \gamma_1}{\partial \mathbf{y}} \\ \hline \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{z}} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{y}} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c|c} \frac{\partial \gamma_2}{\partial \mathbf{z}} & \frac{\partial \gamma_2}{\partial \mathbf{y}} \\ \hline \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{z}} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{y}} \end{array} \right]$$

де з урахуванням позначень:  $a = x^2 + y^2 + z^2$ ,  $b = v_0^2 - gy$ ,  $c = b^2 - ag^2$ ,

$$f_{1,2} = \frac{\sqrt{d_{1,2}}}{\sqrt{2} \cdot v_0}, \quad h_{1,2} = y + \frac{g}{2v_0^2 \cdot f_{1,2}^2}, \quad d_{1,2} = \frac{b \pm \sqrt{c}}{a}$$

$\gamma_{1,2}$  та  $\varphi_{1,2}$  визначені так:  $\gamma_{1,2} = \arcsin(z \cdot f_{1,2})$ ,  $\varphi_{1,2} = \arccos\left(\frac{f_{1,2} \cdot h_{1,2}}{\cos \gamma_{1,2}}\right)$ .

Повна ймовірність влучення осколка в об'єкт:

$$p(2) = p(x, y) + p(z, y) + p(x, z) \quad (7)$$

Розглянуто контрольні об'єкти у формі прямокутного паралелепіпеда. Ймовірність влучення в прямокутну горизонтальну площину з розмірами  $x_1 < x < x_2$ ,  $z_1 < z < z_2$  та у вертикальній стіні об'єкту відповідно дорівнюють:

$$p_{x,z} = \int_{x_1, z_1}^{x_2, z_2} p(x, z) dx dz, \quad p_{x,y} = \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} p(x, y) dx dy, \quad p_{z,y} = \int_{z_1, y_1}^{z_2, y_2} p(z, y) dz dy \quad (8)$$

При визначенні  $p(\gamma)$  прийнято припущення, що диск при руйнуванні має рівно-ймовірні у коловому напрямку характеристики вильоту осколка зі швидкістю  $v = \omega \cdot r$ . Щільність ймовірності вильоту осколка в коловому напрямку дорівнює  $p(\gamma) = 1/\pi$  ( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ).

Визначення ймовірності  $p(\varphi)$  вильоту осколка у бічному напрямку, на відміну від  $p(\gamma)$ , носить менш визначений характер, але, з огляду на досвід експлуатації, прийнято, що виліт осколка найбільш ймовірний у площині обертання диска. За наявними даними ВАТ "Турбоатом" вектор швидкості вильоту осколка від площини обертання диска може відхилитися до  $\pm 25^\circ$ . У загальному випадку при вильоті осколка з кутом  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  і кутом відхилення  $-25^\circ \leq \varphi \leq 25^\circ$ , осколок може впасти в околі турбіни, причому з найбільшою ймовірністю в площині обертання диска і з найменшою ймовірністю на вісь обертання валопроводу турбіни. Для визначення  $p(\varphi)$  прийнято закон нормального розподілу, який використовується, наприклад, при визначенні ймовірності розсіювання й влучення снарядів у ціль при стрілянині. Остаточо прийнято, що щільність розсіювання кутів вильоту осколків

підкоряється нормальному закону із середнім відхиленням кута вильоту від площини обертання  $\sigma$ :

$$p(\varphi) = \frac{\rho}{\sigma \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\rho^2 \cdot (\varphi/\sigma)^2}, \quad (9)$$

де  $\rho$ - постійна, яка дорівнює 0.477.

Ймовірність вильоту осколка в кутовому інтервалі  $\Delta\varphi$

$$p(\Delta\varphi) = F(\varphi_2) - F(\varphi_1), \quad (10)$$

де  $F(\varphi) = \int_{-\varphi}^{\varphi} p(\varphi) d\varphi$ - функція розсіювання кутів вильоту осколків.

Далі в цьому розділі надані розрахункові ймовірності влучення осколків у важливі для безпеки АЕС об'єкти при гіпотетичному руйнуванні ротора парової турбіни, які чисельно отримані в роботі із застосуванням ПЕОМ. Для прикладу в табл. 2 наведені результати розрахунків добутку  $p_{12} = p(1) \cdot p(2)$  ймовірностей руйнування хоча б одного з чотирьох роторів двох турбін енергоблоку №1 Рівненської АЕС і влучення, як мінімум одного осколка з трьох можливих, для найбільш характерних об'єктів АЕС.

Таблиця 2

Об'єкти	$p_{12}$ , на рік
Корпус реактора	$2.0 \cdot 10^{-10}$
Пристрій управління реактором	$4.6 \cdot 10^{-7}$
Парогенератори №3 і №4, кабельні приміщення систем безпеки №1 і №2, кабельна шахта 255	$< 10^{-7}$
Будівельні колони машзала, що розташовані по осях А і Б:	
колони № 9	$1.06 \cdot 10^{-6}$
колони № 5	$1,12 \cdot 10^{-6}$
Трубопроводи:	
№19400 – 3	$1.6 \cdot 10^{-6}$
№23338 – 15	$1.9 \cdot 10^{-6}$
№23338 – 16	$2.6 \cdot 10^{-6}$

Вихідні дані для об'єктів отримані від ВАТ “Київський науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут “Енергопроект”.

У третьому розділі запропоновано та науково-технічно обґрунтовано комплексну методику проектування зварних роторів турбін, за рахунок якої практично забезпечується безаварійна експлуатація парових турбін на АЕС. Ця методика містить комплексне вирішення задач за наступними напрямками: вибір конструкції й матеріалу ротора на підставі експлуатаційних досвідних даних; визначення якості зварних швів на базі сучасних методів неруйнуючого контролю; визначення опору роторів найбільш небезпечним крихким руйнуванням; розгляд питань динаміки та міцності роторів для аналізу коливань і критичних швидкостей, запасів статичної й втомної міцності. Для

науково-технічного обґрунтування методики притягнуті дані світового досвіду, експериментальні методи, методи чисельних розрахунків із застосуванням сучасного обладнання для ультразвукового контролю та фотопружності на базі використання програмних розробок для ПЕОМ. На підставі запропонованої методики проектування роторів турбін, що виготовляють на ВАТ “Турбоатом”, зроблено висновок про рівень забезпечення конструктивної міцності зварних роторів парових турбін АЕС і надано обґрунтування у необхідності підвищення міцності одного з найважливіших вузлів зварного ротора – кореня зварного шва.

Рішенню поставленої задачі присвячено **четвертий розділ** роботи, де розглянуто запроповану методику для підвищення конструктивної міцності кореня зварного шва роторів. Суть методики містить цілеспрямовані зміни у конструкції зварних роторів, які сприяють підвищенню міцності кореня зварного шва. Методика базується на аналізі експлуатації зварних роторів і даних ультразвукового контролю якості шва, даних, отриманих у різноманітних розрахунках пружнопластичного напружено-деформованого стану конструктивних варіантів зварних роторів парових турбін. Для конструкцій зварних роторів з деконцентраторами, з асиметрією в розташуванні дисків, з розточеннями в кільцевих перемичках між дисками та з іншими конструктивними змінами показано можливість забезпечення такого рівня напружень у корені шва, при якому в циклі навантаження не відбувається "розкриття" і зростання дефектів. Наприклад, на рис. 2 схематично проілюстровано вплив асиметрії е ободу 3 відносно внутрішньої частини 4 диску 1 на створення стиску (осьові напруги  $\sigma_z < 0$ ) у корені зварного шва 5.

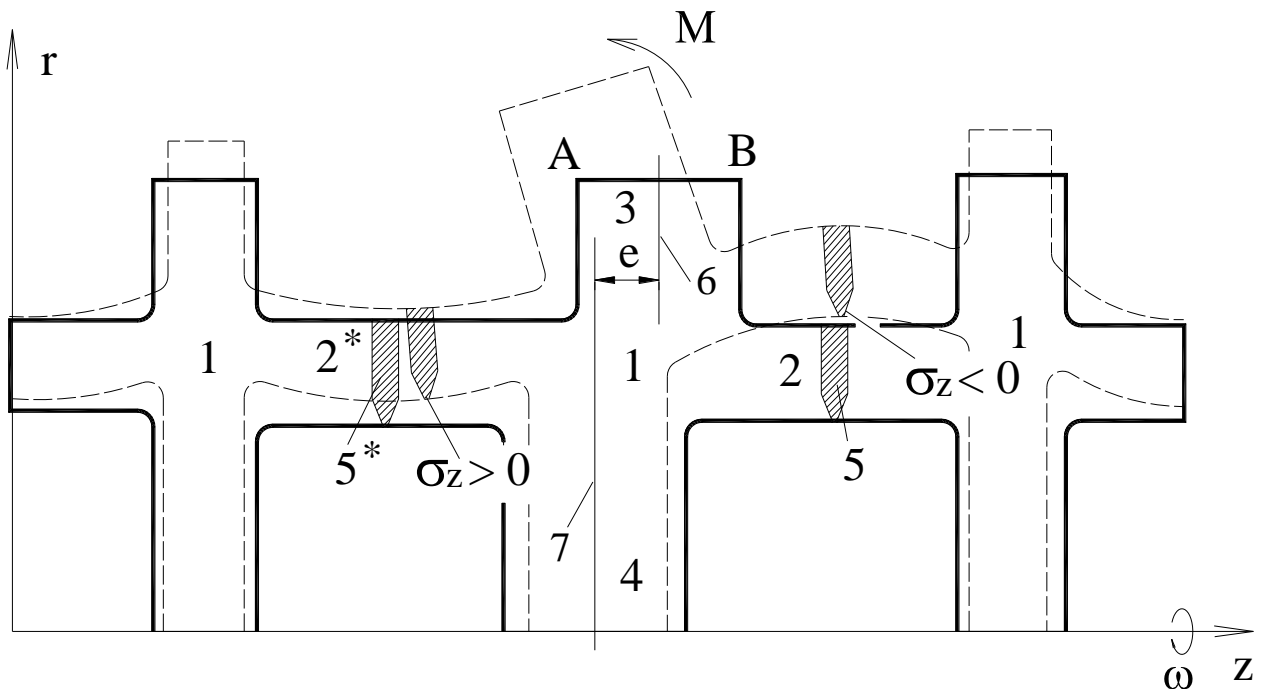


Рис. 2

Характеристику циклу напружень у корені зварного шва у даному випадку й у разі введення деконцентраторів надано на рис. 3.

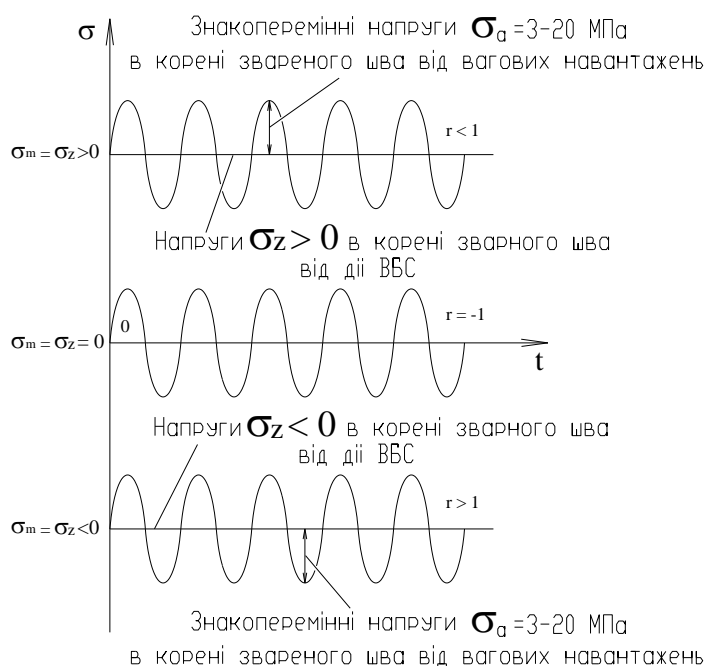


Рис. 3

Циклічне деформування при  $r > 1$  призводить до підвищення міцності кореня зварного шва. Надано рекомендації та висновки щодо підвищення конструктивної міцності кореня зварного шва ротора парових турбін АЕС виробництва ВАТ “Турбоатом”.

## ВИСНОВКИ

На основі досліджень, проведених у дисертаційній роботі, розроблені методи прогнозування безпеки АЕС для прийняття науково обґрунтованих рішень із безпечного розміщення важливих об'єктів на АЕС при гіпотетичному руйнуванні турбіни і створено методику підвищення міцності зварних роторів низького тиску – єдиних елементів парових турбін, здатних при руйнуванні призвести до важкої аварії на АЕС.

Основні наукові й практичні результати, отримані в роботі, полягають у наступному.

1. Уперше запропоновано методику прогнозування безпеки АЕС із ймовірності поразки об'єктів АЕС осколками турбіни, яка заснована на статистичному аналізі руйнувань турбін, розрахункових і узагальнених досвідних даних про найбільш ймовірні характеристики, та створено математичну

модель вірогідного опису польоту осколків, що вилітають, зварних роторів низького тиску турбін при гіпотетичному руйнуванні.

2. Уперше отримано ймовірність руйнування ротора парової турбіни і для такої події знайдені ймовірності вильоту небезпечних осколків у площині обертання дисків роторів і при відхиленні траєкторії від цієї площини, визначені зони вильоту й падіння осколків, ймовірності влучення осколків у важливі для безпеки АЕС об'єкти, що дозволило запропонувати науково обґрунтовані рішення для їхнього розміщення на території АЕС.

3. Надано подальшого розвитку методам проектування й створення зварних роторів парових турбін за рахунок запропонованої у роботі методики комплексної оцінки конструктивної міцності зварних роторів, яка включає дані про стан роторів при експлуатаційних режимах, технології зварювання й крихкого руйнування, комплексні розрахунки динаміки та міцності елементів конструкцій зварних роторів турбін.

4. Запропоновано нові конструкції зварних роторів з деконцентраторами, розточеннями у кільцевих перемичках між дисками й асиметрією розташування обода і центральної частини дисків, що підвищує конструктивну міцність кореня зварного шва, що обґрунтовано аналізом причин поломок зварних роторів, використанням даних ультразвукового контролю якості шва, виконанням різноманітних розрахунків на міцність для цілеспрямованого пошуку конструкції зварних роторів з таким рівнем напруг, при якому в циклі нагрівання не відбувається "розкриття" і зростання дефектів у корені зварних швів роторів.

5. Зроблено висновки та надано рекомендації з підвищення конструктивної міцності кореня зварного шва, які впроваджено у практику створення зварних роторів парових турбін виробництва ВАТ "Турбоатом".

## **СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Вирченко М.А., Левченко Е.В., Сухинин В.П., Гришин Н.Н. Некоторые вопросы безопасности АЭС при гипотетическом разрушении элементов паровой турбины // Ядерная и радиационная безопасность. – К., 2000. - №2. - С. 90-93.

*Здобувачем виконано теоретичні дослідження, пов'язані з математичним обґрунтуванням запропонованих ймовірних оцінок для вильоту та зон падіння осколків ротора турбіни, розрахунки оцінок ймовірності влучення осколків турбіни в об'єкти АЕС при їхньому вильоті в площині обертання ротора і під кутом до неї та сформульовані висновки.*

2. Левченко Е.В., Гришин Н.Н. Особенности напряженно-деформированного состояния сварных роторов // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт".- Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - №25. - С. 103-107.



*Здобувачу належать результати розрахунків і пропозиції до зміни форми елементів зварних конструкцій роторів парових турбін щодо підвищення їхньої конструктивної міцності.*

3. Гришин Н.Н. Полет и зона падения осколков при гипотетическом разрушении ротора паровой турбины АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – К., 2001. - №3. - С. 69-73.

4. Левченко Е.В., Гришин Н.Н., Аркадьев Б.А., Сухинин В.П. Сварные роторы турбоагрегатов (опыт создания и эксплуатации) // Теплоэнергетика. – М., 1998. - №1. - С. 40-43.

*Здобувачем виконано аналіз досвіду проектування, виробництва й експлуатації зварних роторів парових турбін і надано обґрунтування їхніх переваг щодо роторів інших конструкцій.*

5. Сварной ротор турбомашины.: А.с.1687800 СССР, МКИ F 01 D 5/06 / Б.А. Аркадьев, В.П. Сухинин, Н.Н. Гришин, Н.С. Дучкин. (СССР).- №4477224/06; Заявлено 22.09.88; Опубл. 30.10.91, Бюл. №40.-4с.ил.

*Здобувач запропонував спосіб виконання дискретних мас на кільцевій перемичці зі зварним швом для перетворення осьових напруг розтягуючих у стискаючі у корені зварного шва роторів.*

6. Пат. №12876 Україна, МКИ FO1D 5/06. Зварний барабанний ротор турбомашини / В.П. Сухинин, Б.А. Аркадьев, М.М. Гришин, М.С. Дучкин (НВО "Турбоатом").- 4773071/SU; Заявлено 25.12.89; Опубл. 28.02.97, Бюл. №1.-4с.ил.

*Здобувач запропонував методи практичного виконання кільцевих виступів на внутрішньому розточенні барабанного зварного ротора для перетворення осьових розтягуючих напруг у стискаючі у корені зварного шва роторів турбомашин.*

7. Пат. №12877 Україна, МКИ FO1D 5/06. Зварний ротор турбомашини / В.П. Сухинин, Б.А. Аркадьев, М.М. Гришин, М.С. Дучкин (НВО "Турбоатом"). – 4756349/SU; Заявлено 04.11.89; Опубл. 28.02.97, Бюл. №1. -4с.ил.

*Здобувачу належить ідея виконання асиметричних дисків для керування напруженим станом у корені зварного шва роторів.*

8. Сухинин В.П., Зельдес Н.Я., Дучкин Н.С., Гришин Н.Н., Литовка В.А. Некоторые результаты расчета НДС роторов турбин с помощью МКЭ. // Труды Республ. н.-техн. конф. "Методы и модели в системах автоматизированного проектирования энергетических установок".-Часть 2.-Харьков: - 1979. - С. 26-27.

*Особистий внесок здобувача складається з виконання розрахунків НДС роторів турбіни від відцентрових сил, у результаті яких з'явилась можливість використання даних по деформаціях елементів ротора при виборі зазорів проточної частини.*

9. Гонтаровский П.П., Гришин Н.Н., Дучкин Н.С., Руденко Е.К. Использование

математического обеспечения расчета тел вращения при определении напряженно-деформированного состояния элементов турбомашин. // Труды Республ. н.-техн. конф. “Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в системах их автоматического проектирования”. -Часть 2. – Харьков: - 1985. - С. 54-55.

*Здобувач брав участь у розробці математичного забезпечення визначення НДС неоднорідних тіл обертання під дією довільного навантаження та виконав розрахунки НДС зварного ротора під дією власної ваги.*

10. Сухинин В.П., Дучкин Н.С., Гришин Н.Н. Выбор рациональных элементов конструкций и повышение эксплуатационной долговечности сварных роторов турбин. // Труды Республ. н.-техн. конф. “Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования”. -Часть 2. – Харьков: - 1991. - С. 60-61.

*Особистий внесок здобувача складається з виконання аналізу відмінних рис в оцінці НДС зварного ротора, на основі якого запропоновано метод керування напруженим станом у корені зварного шва, та проведено дослідження циклічної довговічності зварних роторів.*

11. Сухинин В.П., Дучкин Н.С., Гришин Н.Н., Литовка В.А. Особенности расчета НДС сборного ротора с центральной стяжкой газотурбинной установки ГТЭ-115 // Тез. докл. Межд. науч.-технич. конф. “Соверш. энергет. и трансп. турбоуст. метод. математ. моделир., вычислит. и физич. эксперим.”. -Часть.3. - Харьков: -1994. - С.65-66.

*Здобувач виконав порівняльний аналіз НДС варіантів зварного й збірною ротора з центральною стяжкою, запропонував метод визначення зусилля затягування з визначенням піддатливості елементів системи дисків і хвостовиків.*

12. Сухинин В.П., Гришин Н.Н., Дучкин Н.С. Повышение конструкционной прочности и эксплуатационной надежности роторов паровых турбин // Тез. докл. Межд. науч.-технич. конф. “Проблемы ресурсо-и природосбережения в энергетике”. Харьков. – 1994. - С.53.

*Здобувач обґрунтував необхідність підвищення конструкційної міцності й експлуатаційної надійності зварних роторів для ЦНТ турбін АЕС, виконав постановку задачі проектування біметалічних зварних роторів.*

13. Левченко Е.В., Гришин Н.Н., Сухинин В.П., Дучкин Н.С. Безопасность АЭС при гипотетическом разрушении ротора турбины. //Труды Междунар. н.-техн. конф. “Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования”.-Харьков: -1997. – С. 304

*Здобувач розробив схему вирішення задачі з оцінки безпеки АЕС при руйнуванні турбіни, визначив елемент турбіни (зварний ротор НТ), руйнування якого може призвести до важкої аварії на АЕС.*

## АНОТАЦІЇ

Гришин М.М. Прогнозування і методи підвищення міцності турбін для безпеки АЕС. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09. - динаміка та міцність машин. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці методики прогнозування безпеки АЕС при руйнуванні турбіни з визначенням найбільш ймовірних характеристик осколків, що вилітають, і створенню комплексної методики підвищення міцності зварних роторів НТ – єдиних елементів турбіни, які при руйнуванні за рахунок виникнення небезпечних осколків можуть призвести до важкої аварії на АЕС.

Робота містить статистичний аналіз руйнувань турбін. Підраховано ймовірність руйнування роторів парової турбіни з визначенням зон вильоту й падіння осколків, ймовірність влучення осколків у важливі для безпеки АЕС об'єкти.

Створено методику комплексної оцінки конструктивної міцності зварних роторів парових турбін, що включає обґрунтований вибір конструкції та матеріалу ротора, забезпечення якості зварних швів, визначення опору роторів найбільш небезпечним крихким руйнуванням, вирішення задач динаміки та міцності роторів. Запропоновано зварні ротори з підвищеною міцністю за рахунок забезпечення напруження такого рівня у корені шва, при якому у циклі навантаження не відбувається "розкриття" і зростання дефектів.

*Ключові слова:* зварні ротори турбін, конструктивна міцність, крихке руйнування, ймовірність, виліт осколків, прогнозування безпеки АЕС.

*Гришин Н.Н. Прогнозирование и методы повышения прочности турбин для безопасности АЭС. – Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09. - динамика и прочность машин. - Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена разработке методики прогнозирования безопасности АЭС при разрушении турбины для принятия научно обоснованных решений по безопасному размещению важных объектов на АЭС и созданию комплексной методики повышения прочности конструкций сварных роторов НД – единственных элементов турбины, как показано в работе,

которые при разрушении за счет образования летящих осколков могут привести к тяжелой аварии на АЭС.

На основе выполненных в работе исследований, предложена новая методика прогнозирования безопасности АЭС по вероятности поражения объектов станции осколками турбины. Работа содержит статистический анализ разрушений турбин, расчетные и обобщенные опытные данные относительно наиболее вероятных характеристик летящих осколков при разрушении роторов ЦНД паровых турбин. Рассмотрена математическая модель описания вероятного полета осколков способных привести к тяжелой аварии на атомной станции. Приведены расчеты по определению вероятности разрушений роторов паровой турбины и для таких событий найдены вероятности вылета опасных осколков в окружном и осевом направлениях. Определены зоны вылета и падения осколков, вероятности попадания осколков в важные для безопасности АЭС объекты. В примерах, для которых выполнены расчетные исследования, предложены научно обоснованные решения по размещению важных объектов на территории АЭС.

Предложена методика комплексной оценки конструктивной прочности сварных роторов паровых турбин производства ОАО “Турбоатом”, которая включает обоснованный выбор конструкции и материала ротора, обеспечение качества сварных швов на базе современных методов неразрушающего контроля, определение сопротивления роторов наиболее опасным хрупким разрушениям, решение задач динамики и прочности роторов для анализа колебаний и определения критических скоростей, запасов статической и длительной прочности. Для научно-технического обоснования методики проектирования сварных роторов турбин привлечены данные мирового опыта, экспериментальные методы и методы численных расчетов с использованием программных разработок для ПЭВМ.

По данным многовариантных расчетов на прочность сварных роторов турбин предложены новые конструкции роторов с деконцентраторами, асимметрией расположения наружных и внутренних частей дисков, кольцевыми перемычками между дисками с дополнительными дискретными массами, что позволило повысить конструктивную прочность корня сварного шва. Конструктивные изменения обеспечивают такой уровень напряжений в корне шва, при котором в цикле нагружения не происходит "раскрытие" и рост дефектов. Рекомендации и выводы по повышению конструктивной прочности корня сварного шва внедрены в практику создания сварных роторов паровых турбин производства ОАО “Турбоатом”.

*Ключевые слова:* сварные роторы турбин, конструктивная прочность, хрупкое разрушение, вероятность, полет осколков, прогнозирование безопасности АЭС.

Grishin N.N. Forecasting and Methods of Enhancing the Turbines Strength to Ensure NPP Safety. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical science according to the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. – National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2003.

The object\_of this work is development of method of forecasting of NPP safety in case of turbine failure, at this determining more probable technical data of the fragments flight, and creation of complex method of enhancing the strength of LP welded rotors, being the only turbine elements which at the moment of failure due to forming of dangerous flying fragments may lead to severe failure at NPP.

The work includes the static analysis of turbine failures. Determined are the probabilities of steam turbine rotors failure and targeting of fragments into the objects being important for ensuring the NPP safety. Also is proposed the methodology of complex evaluation of the structure strength of welded rotors of steam turbines, including the substantiated choice of the rotor design and material, welds quality assurance, determination of the rotors resistance to most dangerous brittle fractures, solving the tasks of the rotor dynamics and strength. Proposed are the welded rotors with enhanced strength due to ensuring the stresses in the weld root, under which within the cycle of loading the defects are not “opening” or increasing.

*Key words:* welded rotors of steam turbines, structure strength, brittle fracture, probability, flight and targeting of fragments, weld root, forecasting of NPP safety.