

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

© 2023

- К. А. Лонин** инженер;
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород;
lonin_ka@okbm.nnov.ru
- В. А. Панов** доктор технических наук, помощник начальника департамента научно-технического обоснования проектов по направлению прочность и целостность конструкций;
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород;
varanov@okbm.nnov.ru
- В. Л. Патрушев** кандидат технических наук, главный специалист;
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород;
patrushev@okbm.nnov.ru
- Д. В. Савчук** инженер-конструктор;
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород;
savchuk_dv@okbm.nnov.ru
- С. А. Соловьев** кандидат технических наук, начальник бюро
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород;
solovev_sa@okbm.nnov.ru

Рассмотрены задачи и подходы к их решению при анализе и обосновании вибропрочности и динамической защищённости механического оборудования (электронасосов, приводов системы управления и защиты) судовой реакторной установки. Актуальность работы определена опытом эксплуатации объектов атомной энергетики. Проведённые работы по созданию цифровых моделей оборудования реакторной установки и расчётное компьютерное моделирование позволило исключить натурный эксперимент по обоснованию сейсмостойкости приводов системы управления и защиты. С целью обоснования вибропрочности и ресурса гидрокамеры главного циркуляционного электронасоса реакторной установки разработана компьютерная модель корпуса реакторной установки с электронасосом, проведено расчётно-экспериментальное исследование их вибрационного состояния. Также проведено расчётно-экспериментальное исследование вибрационного состояния приводов системы управления и защиты.

Вибропрочность; динамическое воздействие; расчётное компьютерное моделирование; реакторная установка; привод системы управления и защиты; численный эксперимент; электронасос

Цитирование: Лонин К.А., Панов В.А., Патрушев В.Л., Савчук Д.В., Соловьев С.А. Особенности решения задач прочности при динамическом нагружении оборудования реакторной установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 2. С. 57-66.
DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-57-66

Введение

Одним из приоритетов работ, выполняемых АО «ОКБМ Африкантов», является обеспечение безопасности проектируемых изделий для реакторных установок (РУ), которая представляет собой сложную конструкцию, состоящую из множества отдельных сборочных единиц оборудования и трубопроводов, блоков биологической защиты и теплоизоляции (рис. 1). Конструкция РУ в целом и отдельное оборудование кроме весовой нагрузки подвергается воздействию давления среды, значительных перепадов температур, вибрации и возможных внешних динамических воздействий (землетрясение, падение летательных аппаратов, воздушная ударная волна, столкновение судов и т.д.).

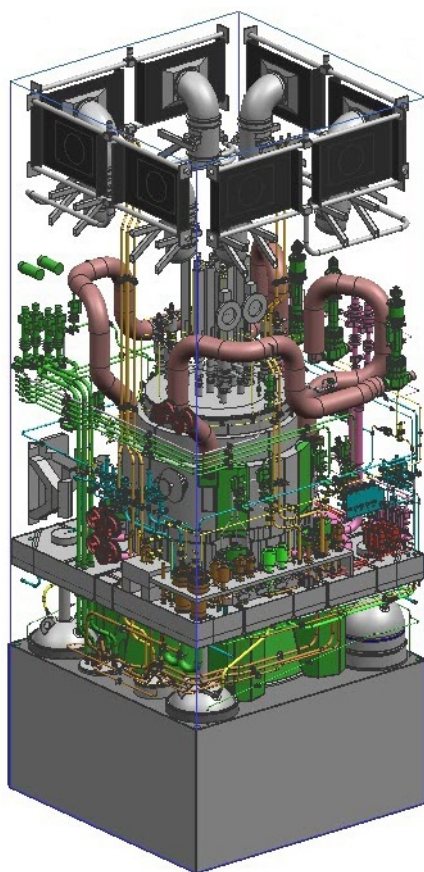


Рис. 1. Общий вид реакторной установки

Механические динамические процессы в реальных конструкциях РУ (элементах реактора, электронасосов, приводов системы управления и защиты (СУЗ) и др.) при их эксплуатации связаны с вибрациями, возникающими как в результате работы основного оборудования, так и обусловленных частотами вращения роторных систем, гребных винтов ледоколов, особенно при прохождении «тяжёлых» льдов.

При аварийных ситуациях рассматриваются внешние динамические воздействия природного и техногенного характера. Рассмотрение таких воздействий на оборудование РУ является особым классом задач, в которых целостность элементов РУ должна оцениваться на основе анализа динамических характеристик, расчёта динамики и упругопластического расчёта напряженно-деформированного состояния с использованием адекватных моделей деформирования конструкционных материалов, современных критериев прочности.

Обоснование прочности оборудования и трубопроводов РУ проводится в обеспечение требований норм расчёта на прочность ПНАЭ Г-7-002-86 и норм проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. При проектировании судовых РУ учитываются требования норм расчёта на прочность НП-054 и Морского Регистра.

Сложность, а порой и невозможность реализации экспериментов на физических моделях и натуральных объектах с учётом всех факторов нагружения, включая аварийные ситуации, их значительная стоимость и сокращение сроков разработки проектов выдвигают на первый план компьютерные методы расчётного виртуального моделирования. Также актуальной является разработка «цифровых двойников» оборудования и РУ с целью прогнозирования, в частности, остаточного ресурса и возможности продления эксплуатации оборудования РУ.

Компьютерное моделирование с использованием трёхмерных моделей РУ на этапе проектирования позволяет выявлять «узкие» места конструкции и «перезапасы», проводить оптимизацию элементов РУ для снижения материалоёмкости изделия, снижения повреждённости элементов РУ и улучшения эксплуатационных свойств оборудования в целом. Полученные решения позволяют делать заключения о необходимости и целесообразности тех или иных экспериментальных исследований, а также оценить последствия динамических воздействий на РУ. Разработка трёхмерной расчётной модели реакторной установки проводится по определённой технологии в рамках разработанной концепции моделирования.

Расчётный анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) проводится с использованием верифицированных программных средств (ПС). Требования по верификации и аттестации ПС обусловлены действующими в РФ федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии. Целью аттестации является оценка применимости программного средства (т.е. обоснованности применения) в соответствующей области исследования. Результаты аттестации учитываются при проведении экспертизы материалов по обоснованию безопасности объектов использования атомной энергии в рамках процедур лицензирования.

Цели и задачи

Целью проведённых работ явилось расчётно-экспериментальное обоснование вибропрочности и ударостойкости (сейсмостойкости) элементов приводов СУЗ, обоснование вибропрочности гидрокамеры (ГК) главного циркуляционного электронасоса (ЦНПК) РУ универсального атомного ледокола (УАЛ).

Анализ динамической прочности сводится к решению следующих задач:

- разработка концептуального подхода к компьютерному моделированию РУ;
- разработка компьютерных расчётных моделей оборудования и модели РУ, отражающей реальную компоновку;
- идентификация параметров расчётной модели по результатам экспериментов;
- выполнение расчётного моделирования в обоснование динамической прочности оборудования с учётом эксплуатационных воздействий;
- анализ напряжённо-деформированного состояния и оценка вибропрочности, сейсмостойкости и ударостойкости согласно требованиям норм расчёта на прочность;
- определение усилий, приходящих на элементы крепления оборудования (амплитудно-временная характеристика);
- определение ускорений, приходящих на отдельное оборудование (амплитудно-временная характеристика);
- определение перемещений отдельного оборудования (амплитудно-временная характеристика);
- анализ собственных частот колебаний и частотного отклика элементов оборудования (амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики);
- верификация расчётных моделей на основе экспериментальных данных.

Анализ напряжённо-деформированного состояния проводится с учётом возникновения в конструкции предельных состояний. Первое предельное состояние характеризуется достижением в наиболее напряжённых областях конструкции заданной пластической деформации (кратковременное разрушение: вязкое или хрупкое). Второе предельное состояние характеризуется достижением линейных или угловых перемещений, при которых может произойти нарушение работоспособности конструкции. Третье предельное состояние характеризуется возникновением макротрещин при циклическом нагружении.

Описание концепции моделирования

Исходя из комплекса решаемых задач, концепция моделирования может быть представлена в двух направлениях (рис. 2):

– моделирование в «большом» – моделирование РУ в целом с использованием моделей отдельного оборудования, трубопроводов и блоков оборудования. В результате определяется напряжённно-деформированное состояние основного оборудования и несущих элементов, а также нагрузки, действующей на отдельное оборудование;

– моделирование в «малом» – моделирование отдельных компонентов РУ с использованием моделей отдельных деталей, сборочных единиц с элементами крепления и т.п. Исходными данными для расчётного моделирования являются нагрузки, действующие на узлы крепления.

Отличие будет состоять в объёме и детализации проработок конструкторской и расчётной геометрических моделей, объёме получаемых данных, использовании различных мощностей ЭВМ, типах конечных элементов, используемых расчётных программ, временных затратах на разработку геометрических и расчётных моделей, различном времени для проведения расчёта и для анализа полученных данных.

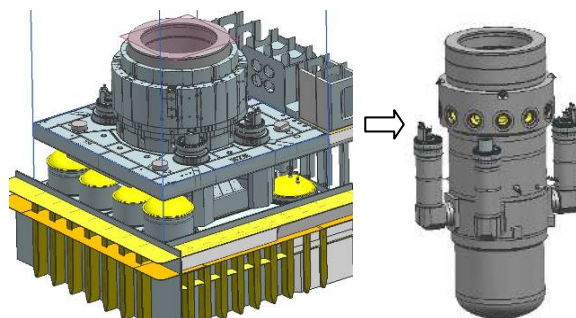


Рис. 2. Схема концепции моделирования

Особенности разработки компьютерной расчётной модели

Использование метода конечных элементов почти всегда вносит некоторые упрощения по отношению к реальному объекту. В связи с этим решающим этапом анализа является этап определения необходимых упрощений при построении модели, решении и обработке результатов. Поскольку метод конечных элементов является численным методом, то точность получаемых результатов зависит от типа, размеров и размещения конечных элементов. Использование моделей с крупной сеткой в общем случае, например, даёт результаты, заниженные примерно на 20...40% по сравнению с действительными значениями. Уменьшение размеров элемента до приемлемого уровня обеспечивает нужную детализацию расчётной модели и получение более достоверных результатов. Однако использование конечных элементов более высокого порядка и уменьшение длины грани элемента не всегда приводит к увеличению точности получаемых результатов, а в некоторых случаях является нерациональным.

Оптимизация конечно-элементной сетки необходима ввиду того, что расчётная модель РУ имеет большое количество объёмов (элементов, узлов), а сам динамический расчёт РУ с учётом задания упругопластических свойств конструкционных материалов и наличия условий контактного взаимодействия элементов, предполагает многоитерационные решения.

Суть оптимизации конечно-элементной сетки заключается в выборе типа элемента (восьмиузловой, шестнадцатиузловой и т.п.), вида элемента (гекса-, тетра-), минимизации размера сетки (количество элементов, узлов) без потери точности в результатах расчёта в общем по конструкции и, в том числе, в местах концентрации напряжений.

Особенности расчётного моделирования при динамическом воздействии

Имеются существенные различия между явлением разрушения при импульсных нагрузках и явлением разрушения при статических нагрузках. При статических нагрузках напряжения и деформации распределены по всему нагруженному телу, так что каждая часть тела имеет возможность принимать участие в инициировании разрушения. Если разрушение началось от статической нагрузки, то важную роль начинают играть концентрации напряжений, вызываемые распространением разрушения (образованием трещины). При импульсивных нагрузках могут существовать очень локализованные переходные напряжения и деформации, так что в этом случае разрушения могут возникнуть в одной части образца совершенно независимо от того, что происходит в другой части. Напряжённое состояние в импульсивно нагруженном теле может изменяться так быстро, что возникающие при этом разрушения не успеют ещё распространиться, а распределение напряжений уже изменится [1].

Влияние ударного действия нагрузки на величину деформации или нагружения при анализе принято оценивать коэффициентом динамичности [2].

Несмотря на кажущуюся простоту решения с использованием современных численных методов и использованием супер-ЭВМ, следует понимать, что математические модели объективно не могут точно отразить все условия реализации динамических процессов сложного уникального объекта РУ. Степень совпадения расчётных и экспериментальных результатов зависит от точности измерительной аппаратуры, применяемой в эксперименте, характеристик шумов в объекте исследования, а также от того, насколько точно выполняются допущения, на основе которых разработана расчётная модель и насколько точно соответствуют реальным значениям параметры и исходные условия, задаваемые в расчётной модели. Чтобы исключить хотя бы часть возможных причин различий результатов расчётов и экспериментов, необходимо предварительно провести технически возможные специальные эксперименты по идентификации параметров расчётной модели.

Такие эксперименты по подтверждению вибрационных характеристик проведены на этапе изготовления и монтажа рассматриваемого оборудования РУ: приводы стержневой системы управления и защиты; корпус РУ; электронасосы первого контура на этапах изготовления, монтажа, швартовых испытаний УАЛ.

Расчётно-экспериментальное обоснование сейсмостойкости приводов системы управления и защиты

Целью проведённой работы являлось расчётное обоснование сейсмостойкости комплекта приводов СУЗ (рис. 3) и анализ возможности исключения изготовления опытных образцов приводов СУЗ РУ РИТМ-200 для испытаний на ударостойкость.

С использованием современных САД и САЕ программ на базе конструкторских моделей разработаны расчётные компьютерные модели приводов СУЗ РУ РИТМ-200. Для верификации методики разработки расчётных моделей использованы данные испытаний прототипов приводов СУЗ, проведённые на копре К-4000 и вибростенде.

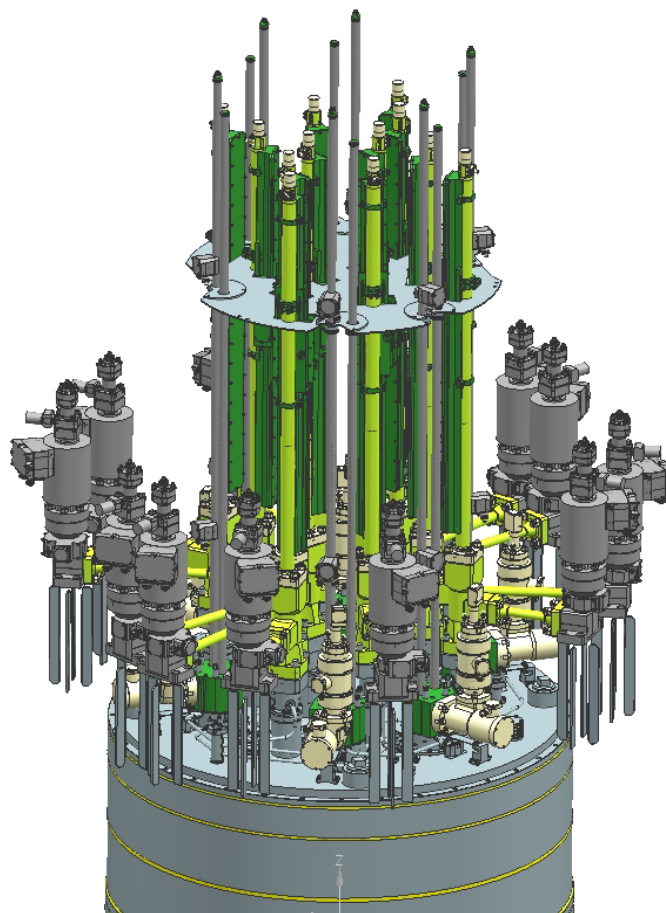


Рис. 3. Геометрическая модель приводов системы управления и защиты

В процессе испытаний приводов СУЗ контролировались и измерялись параметры: амплитуда и длительность воздействия; наличие механических повреждений и разрушений; перемещение (проседание в момент удара) рейки с грузом – имитатором рабочего органа.

В ходе экспериментов были определены формы собственных колебаний и значения собственных частот. Анализ экспериментальных данных и результатов расчёта при принятых условиях моделирования элементов привода ГК показал идентичность собственных форм колебаний привода и модели привода ГК. Проведённые расчёты при моделировании динамических воздействий с использованием расчётной модели приводов СУЗ показали удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных данных.

С использованием верифицированных моделей отдельных приводов СУЗ разработана расчётная модель комплекта приводов РИТМ-200 УАЛ (рис. 4), учитывающая конструктивные особенности компоновки на крышке парогенерирующего блока (ПГБ).

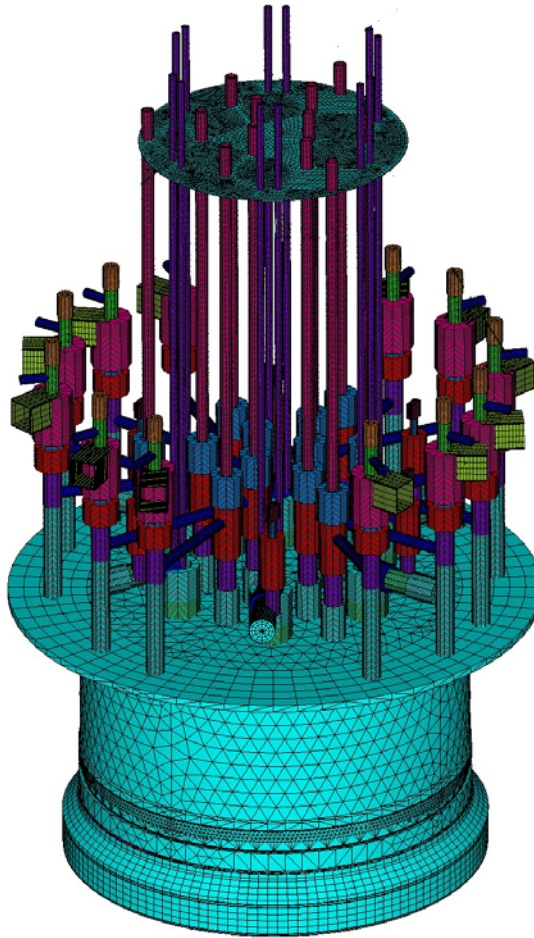


Рис. 4. Расчётная модель комплекта приводов

С использованием разработанных моделей проведён численный эксперимент, по результатам которого обоснована сейсмостойкость приводов СУЗ РУ РИТМ-200. Определена возможность исключения изготовления опытных образцов приводов СУЗ РУ РИТМ-200 для испытаний на сейсмическое воздействие.

Расчётно-экспериментальное обоснование вибропрочности гидрокамеры главного циркуляционного электронасоса

Объектом исследования явилась ГК ЦНПК парогенерирующего блока (рис. 5). При работе ЦНПК возможны резонансные явления, обусловленные совпадением собственных частот колебаний гидрокамеры с частотами вращения ротора ЦНПК.

Целью работы являлось расчётно-экспериментальное исследование вибрационных характеристик гидрокамеры ЦНПК при вращении ротора в рабочем диапазоне частот электронасоса и обоснование вибропрочности ПГБ.

Одним из безусловных требований обеспечения вибропрочности оборудования является отстройка собственных частот колебаний от дискретных частот детерминированного возбуждения (ПНАЭ-Г-7-002-86 и НП-054-04).

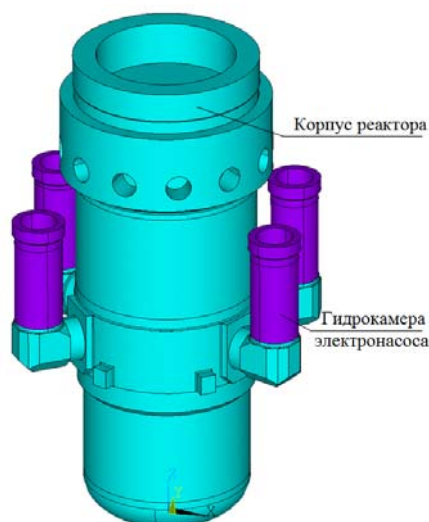


Рис. 5. Общий вид расчётной модели парогенерирующего блока

Условие отстройки собственных частот для первых трёх форм колебаний элементов конструкции в каждой плоскости регламентировано нормами ПНАЭ-Г-7-002-86:

$$f_i/\omega \geq 1,3 \text{ и } f_i/\omega \leq 0,7,$$

где f_i – собственная частота колебаний по i -й моде ($i = 1, 2, 3$); ω – частота возбуждения.

В случае невозможности выполнения требований данных условий необходимо показать, что уровни вибрации элементов конструкции находятся в допустимых пределах, что должно подтверждаться расчётом вынужденных колебаний и экспериментальными исследованиями (определяются вибронпряжения и виброперемещения).

Полученные расчётом или экспериментом напряжения от высокочастотного нагружения должны учитываться в расчётах на циклическую прочность. При этом особо обращается внимание на те случаи, когда низкочастотные циклические напряжения, связанные с пуском, остановкой, изменением мощности, срабатыванием аварийной защиты и др., сопровождаются наложением высокочастотных колебаний амплитуды напряжений, что может приводить к значительному росту повреждённости материала элемента конструкции.

Для проведения расчётного исследования вибрационных характеристик гидрокамеры ЦНПК разработана расчётная конечно-элементная модель ПГБ, учитывающая его массовые и инерционные характеристики. По результатам модального анализа определено, что собственные частоты гидрокамеры находятся близко к рабочему диапазону частот вращения ротора ЦНПК.

В качестве основной причины вибрационного возбуждения со стороны ЦНПК принимается дисбаланс ротора. Максимальный уровень возбуждения соответствует максимальной частоте вращения ротора. Допустимый дисбаланс определён по ГОСТ 1940-1-2007 и принимается при проведении расчётов в качестве исходных данных.

В результате численного анализа вибрационного состояния гидрокамеры ЦНПК определён один из параметров вибрации – виброскорость ГК ЦНПК (рис. 6), которая находится в допустимых пределах. Для уточнения вибрационных характеристик состояния ГК ЦНПК на этапе монтажа ПГБ были проведены эксперименты по исследованию его вибрационного состояния с использованием имитатора вибрационного воздействия.

По результатам измерений определены собственные частоты колебаний ГК ПГБ, которые были использованы при верификации расчётной модели ПГБ. На этапе швартовых испытаний проведённые замеры на ЦНПК показали отсутствие резонансов и превышение установленных пределов по вибрации.

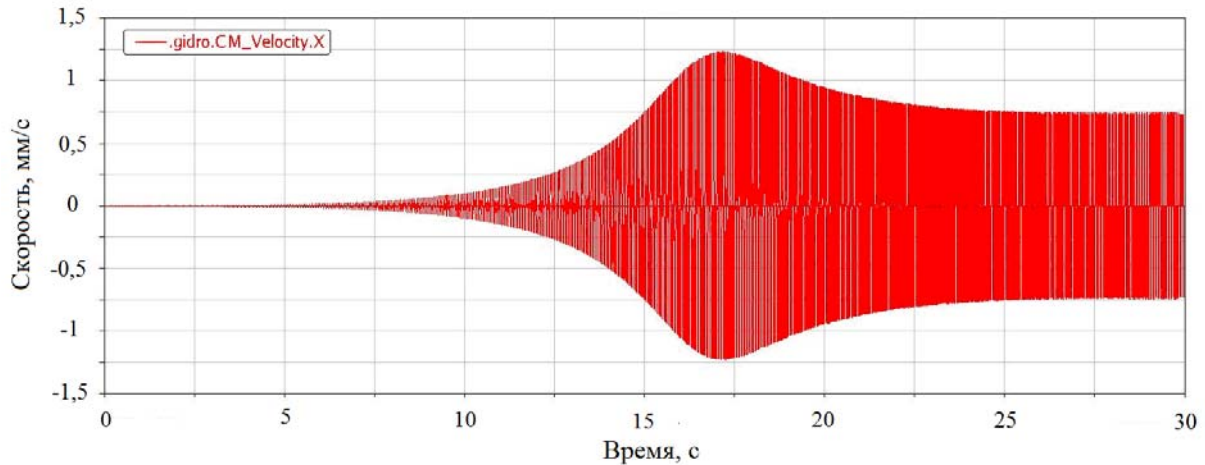


Рис. 6. Результаты расчётов вибропрочности гидрокамеры

Заключение

Расчётно-экспериментальное исследование и прогнозирование поведения элементов конструкций РУ при эксплуатации в условиях динамического нагружения является важным этапом работ при оценке их прочности, работоспособности и обоснования безопасности РУ в целом.

Использование отработанных методик и верифицированных расчётных моделей оборудования позволяет:

- выявлять на этапе проектирования конструктивные узлы и элементы, определяющие вибрационное состояние и динамическую защищённость оборудования РУ и разрабатывать конструктивные решения и мероприятия по обеспечению их вибропрочности и ударостойкости (сейсмостойкости);
- по результатам численного компьютерного моделирования исключать часть экспериментальных исследований, обосновывающих несущую способность оборудования РУ;
- снижать время на проектирование оборудования.

Библиографический список

1. Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 296 с.
2. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.

SPECIAL FEATURES OF ASSESSING THE STRENGTH OF NUCLEAR REACTOR EQUIPMENT UNDER DYNAMIC LOADS

© 2023

- K. A. Lonin** Engineer;
JSC “Afrikantov Experimental Design Bureau of Machine Building”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
lonin_ka@okbm.nnov.ru
- V. A. Panov** Doctor of Science (Engineering), Assistant Head of Department,
JSC “Afrikantov Experimental Design Bureau of Machine Building”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
vapanov@okbm.nnov.ru
- V. L. Patrushev** Candidate of Science (Engineering), Main Specialist;
JSC “Afrikantov Experimental Design Bureau of Machine Building”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
patrushev_vl@okbm.nnov.ru
- D. V. Savchuk** Design Engineer;
JSC “Afrikantov Experimental Design Bureau of Machine Building”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
savchuk_dv@okbm.nnov.ru
- S. A. Soloviev** Candidate of Science (Engineering), Head of Bureau,
JSC “Afrikantov Experimental Design Bureau of Machine Building”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
solovev_sa@okbm.nnov.ru

The paper presents tasks and approaches to their solutions in assessing vibration strength and dynamic safety of marine reactor equipment (for example: pumps, control driven rod mechanisms). The topicality of this work is determined by the experience of operating nuclear power plants. Development of digital computation models and computational analysis allowed us to exclude experimental validation of control driven rod mechanisms’ seismic resistance. A digital computational model was developed for validating the dynamic safety and life time of the seal pot of the reactor facility main circulation pump. The model included the main circulation pump and the framework of the reactor facility. Computational and experimental analysis of the vibration state of the control and protection system drives was also carried out.

Vibration strength; dynamic effect; computer simulation; reactor facility; control and protection system drives; numerical experiment; electric pump

Citation: Lonin K.A., Panov V.A., Patrushev V.L., Savchuk D.V., Soloviev S.A. Special features of assessing the strength of nuclear reactor equipment under dynamic loads. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 2. P. 57-66. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-57-66

References

1. Rinehart J.S., Pearson J. Behavior of metals under impulsive loads. Cleveland, Ohio: American Society for Metals, 1954. 256 p.
2. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference book on resistance of materials]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1975. 704 p.