

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD МОДЕЛИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ДЛЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ ТВС

© 2019 К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, И. Афшар, Д.А. Писарева

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Разработана картограмма изменения собственной частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) в активной зоне реактора для прогнозирования условий роста вибраций тепловыделяющих сборок (ТВС) ВВЭР-1200. Определение средней температуры и давления теплоносителя в активной зоне в номинальном режиме проведено путем применения известных результатов расчета, полученных при использовании теплогидравлической трехмерной CFD- модели реактора ВВЭР-1200. Показано, что совпадение СЧКДТ с частотой вибраций ТВС возможно лишь при определенных значениях давления и температуры теплоносителя, а усиление вибраций происходит только в области температур, соответствующих полосе пропускания относительно выявленного значения СЧКДТ. Показано, что на разных этапах пуска реактора возможно усиление изгибных колебаний ТВС-2М.

Ключевые слова: частота, колебания, давление, теплоноситель, вибрации, износ.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 16.09.2019

Принята к публикации 27.09.2019

Введение

Проблема выявления и устранения причин аномальных вибраций тепловыделяющих сборок (ТВС) является актуальной для всех стран, эксплуатирующих АЭС. В настоящее время во всех ведущих в атомной энергетике странах мира реализуется «Концепция нулевого дефекта тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)» [1, 2]. Её целью является минимизация выхода радиоактивных продуктов деления из ТВЭЛ. Уменьшение циклических нагрузок и вибраций необходимо для увеличения кампании топлива, совершенствования топливного цикла и, как следствие, для сокращения объемов радиоактивных отходов, подлежащих переработке и захоронению.

В результате колебаний теплоносителя возникают циклические изгибные деформации оболочек ТВЭЛ. Образование и развитие дефектов в результате: коррозионно-усталостных процессов и динамического взаимодействия оболочек ТВЭЛов с дистанционирующими решетками (ДР) приводит к фреттинг-износу и повреждениям твердыми частицами (дебрис – износ) оболочек в зоне их контакта с пуклевками ДР [3-5]. Циклические напряжения в зоне крепления хвостовиков ТВЭЛов в нижней опорной решетке, способствуют инициированию и дальнейшему развитию механического износа хвостовиков [6].

Результаты исследований надежности ТВС, после трех циклов их работы на АЭС Вульф Крик, приведены в [3]. В работе [7] проведено моделирование процесса возбуждения больших вихрей вниз по течению от смесительной решётки с использованием техники, применяемой в вычислительной гидродинамике (LES-модель турбулентности в коммерческих CFD программах). В работе [8] выполнено моделирование LES движения больших вихрей в пространстве, окружающем один

стержень. Для вычисления вибрации топливного стержня использованы турбулентные нагрузки. В работах [9-11] рассматривались модели фреттинг изнашивания в местах контакта ДР с ТВЭЛ для PWR, а также влияние условий закрепления ТВЭЛ на их вибрацию. В работе [12] проведена верификация результатов исследования пучка стержней. В работе [13] выполнены CFD расчеты. Для этого исследования были использованы сетки с 7, 16 и 60 миллионами элементов. Показано, что результаты расчетов могут быть использованы для определения действующих на ТВЭЛ сил и для последующего динамического анализа.

Прогнозирование условий роста вибраций ТВС ВВЭР-1200

В работе [14] разработан и применен теплогидравлический трехмерный CFD-код модели реактора ВВЭР-1200, содержащий ~1 млрд. ячеек. Разработанная модель позволяет определять распределение температуры и давления теплоносителя в реакторе. Обработка результатов расчета позволяет получить ряд параметров, характеризующих работу реакторной установки: распределение расходов на входе и на выходе из активной зоны, распределение подогревов в ТВС, коэффициентов гидравлического сопротивления элементов проточного тракта реактора и т.д. На рисунке 1 показано распределение давления и температуры по CFD модели реактора

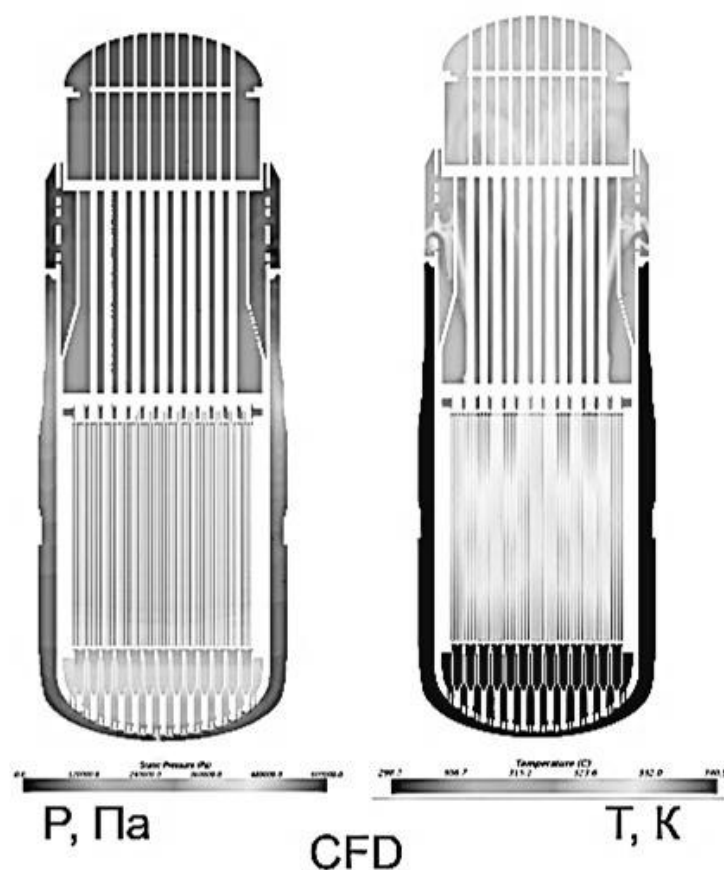


Рисунок 1 – Распределение давления и температуры по CFD модели реактора [The distribution of pressure and temperature in the CFD reactor model]

Давление теплоносителя по сечению CFD модели активной зоны показано на рисунке 1, расчет скорости звука в теплоносителе и его плотности проведены с использованием программы WaterSteamPro [16], разработанной и внедренной НИУ «МЭИ».

Величины теплогидравлических параметров в расчетной модели ТВС по высоте активной зоны взяты согласно данным из таблицы 1. [14].

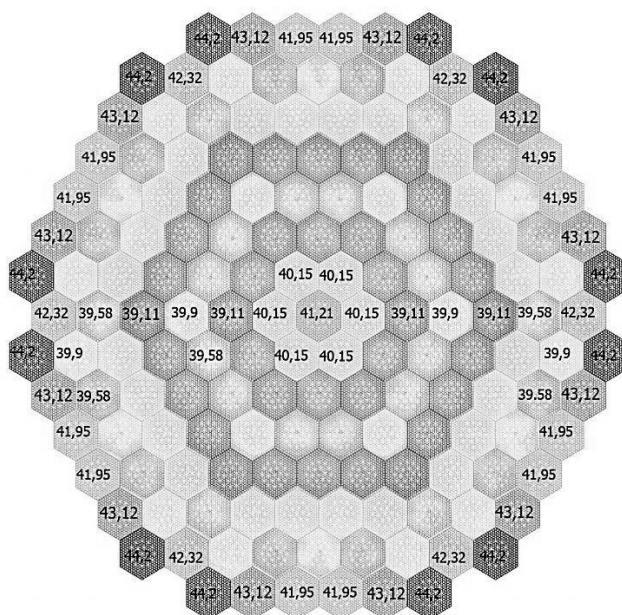


Рисунок 3 – Картограмма СЧКДТ при номинальном режиме, Гц [Cartogram of NFCPO at the nominal mode, Hz]

Результаты расчета СЧКДТ, представленные на рисунке 3, указывают на отсутствие в номинальном режиме эксплуатации реактора ВВЭР-1200 условий, необходимых для возникновения резонансных колебаний ТВС-2М с потоком теплоносителя.

Усиление изгибных колебаний ТВС-2М на этапах пуска реактора

Проведены сопоставление результатов расчетов СЧКДТ CFD модели с собственной частотой колебаний макета ТВС-2М, частота которого, в зависимости от формы колебания [17], варьируется в диапазоне от 5 Гц до 35,5 Гц.

В этой работе выявлено, что при эксплуатации влияющим фактором на вибрации ТВЭЛов оказывает расход теплоносителя. В таблице 3 приведены собственные частоты колебаний макета ТВС-2М [17]. Источником вибрации в теплоносителе являются локальные возмущения потока теплоносителя. Однако влияние температуры теплоносителя на вибрации ТВС не было обнаружено.

Таблица 3 – Собственные частоты колебаний макета ТВС-2М [Natural frequencies of FA-2M layout]

Форма колебаний	Частота ТВС – 2М, Гц
1-я изгибная	5
1-я крутильная	8
2-я изгибная	10,5
2-я крутильная	16
3-я изгибная	16,5
3-я крутильная	24
4-я изгибная	23
5-я изгибная	28,5
6-изгибная	35,5

Известно, что при воздействии внешнего источника возмущений с частотой в 2 раза превышающую частоту собственных колебаний объекта возникает резкое увеличение амплитуды колебаний объекта.

В таблице 4 приведены значения параметров теплоносителя, при которых величина СЧКДТ в активной зоне в два раза больше собственных частот вибраций ТВС-2М, а

также при которых они равны четырехкратной частоте оборотов главного циркуляционного насоса (ГЦН).

Таблица 4 – Параметры теплоносителя, при которых СЧКДТ в два и в четыре раза превышает частоту вибрации ТВС [The parameters of the coolant where NFCDT is two or four times higher than the frequency of fuel assembly vibration]

Форма колебаний	Частота вибраций ТВС-2М, Гц	Двукратная частота возмущающих воздействий, Гц	Четырехкратная частота возмущающих воздействий, Гц	Скорость звука в теплоносителе, м/с	Температура при P=8 МПа, °С	Температура при P=10 МПа, °С	Температура при P=12 МПа, °С	Температура при P=16 МПа, °С
3-я изгибная	16,5	-	66	1471,4	160	159	161	167
4-я изгибная	23,0	46	-	1025,8	280	283	285	290
5-я изгибная	28,0	56	-	1248,8	230	233	235	240
6-я изгибная	35,5	71	-	1583,3	80	83	84	90

Данные, приведенные в таблице 4, указывают на то, что на некоторых этапах пуска реактора ВВЭР-1000 возможно усиление изгибных колебаний ТВС-2М, и что этот фактор необходимо учитывать при анализе остаточного ресурса и обеспечения допустимого износа в результате процесса фреттинг-коррозии.

Показано, что совпадение СЧКДТ и вибраций ТВС возможно лишь при определенном значении средней температуры теплоносителя в активной зоне и только в области температур, соответствующих полосе пропускания относительно выявленного значения СЧКДТ.

В работе [18] проведены исследования вибраций в потоке теплоносителя с температурой 20-40 °С и с максимальным проектным расходом через ТВС.

Пульсации давлений по амплитуде превосходили максимальные приемлемые амплитуды при пусконаладочных измерениях на ВВЭР-1000 примерно на 10-20%.

Во время исследования с помощью лазерных виброметров через прозрачные окна в колонке стенда измерялась вибрация ТВЭЛов, возбуждаемая потоком. Совместно проводилось измерения вибраций одного и того же ТВЭЛа в двух направлениях в каждом из пролетов.

Пульсации давления, созданные на стенде, представлены на рисунке 4. Спектральная характеристика пульсаций давления построена на базе реально полученного спектра при исследовании ядерного реактора для воссоздания условий эксперимента с соответствующими динамическими характеристиками.

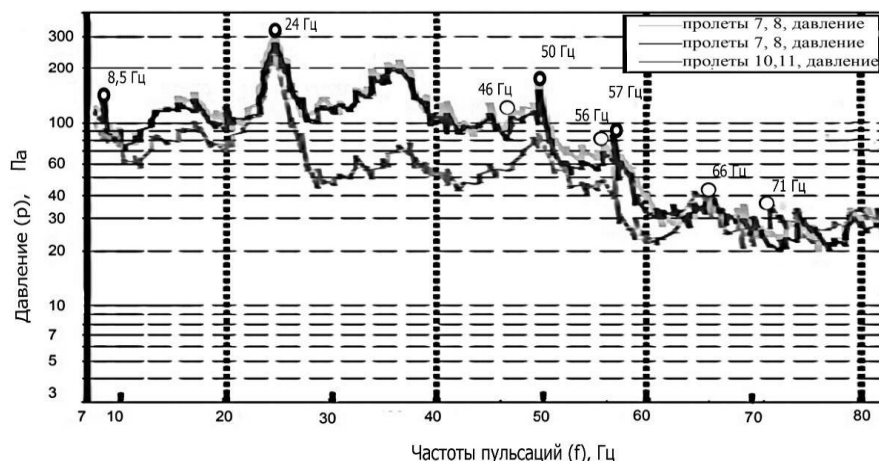


Рисунок 4 – Спектральная характеристика пульсаций давления в макете ТВС [Spectral characteristics of pressure pulsations in the fuel assembly layout]

На рисунке 4 обозначены частоты пульсаций давления, приведенные в таблице 2. На спектральной характеристике пульсаций давления в макете ТВС видно, что этим частотам соответствуют выраженные пики.

С учетом того, что представленная на рисунке 4 спектральная характеристика пульсаций давления соответствует измерениям, проведенным на реакторе ВВЭР-1000, можно констатировать, что результаты прогнозирования параметров теплоносителя, при которых увеличивается уровень вибраций ТВС в реакторе ВВЭР-1200, подтверждены данными измерений на эксплуатируемых энергоблоках.

Результаты прогнозирования, проведенные на основе данных CFD модели, указывают на отсутствие в номинальном режиме эксплуатации реактора ВВЭР-1200 условий, необходимых для возникновения резонансных колебаний ТВС-2М с потоком теплоносителя.

Заключение

Интенсивность износа защитной оболочки ТВЭЛ при фреттинг-коррозии (ФК) возрастает при виброакустическом резонансе, при котором частоты вибраций ТВЭЛ и/или ТВС попадают в полосу пропускания акустических колебаний теплоносителя в активной зоне реактора.

Максимальное усиление вибраций ТВС происходит при совпадении СЧКДТ с частотой вибраций (при определенных значениях средней температуры и давления теплоносителя в активной зоне).

Рост уровня вибрации имеет место при нахождении частоты вибраций в полосе пропускания выявленного значения СЧКДТ.

Для предотвращения резонанса колебаний теплоносителя с вибрациями ТВС необходимо и достаточно вывести собственную частоту колебаний ТВС за пределы полосы пропускания.

Результаты прогнозирования, проведенные на основе данных CFD модели, указывают на отсутствие в номинальном режиме эксплуатации реактора ВВЭР-1200 условий, необходимых для возникновения резонансных колебаний ТВС - 2М с потоком теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгов, А. Б. Стратегия движения к нулевому отказу ядерного топлива / А. Б. Долгов, О. Г. Черников // Доклад на Пленарном заседании Международной научно-технической конференции «Безопасность, экономика и эффективность атомной отрасли», Москва, 25-27 мая 2016. – URL : http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/Materials_2016/Plenar_rus/Strategiya_dvizheniya_k_nulevomu_otkazu_20_05_16.pdf (дата обращения: 16.09.2019).
2. Трипотень, Е. Нулевой отказ как идеология / Е. Трипотень // Атомный эксперт. – 2016. – № 6 (48). – С. 50-55.
3. Billerey A. Evolution of the fuel rod support under irradiation and its impacts on the mechanical behavior of the fuel assemblies, IAEA, Vienna, 2005.
4. Vallory J. Methodology of PWR fuel rod vibration and evaluation in HERMES Facilities, IAEA, Vienna, 2005.
5. Gottuso D., Canat J.N., Mollard P. A family of upgraded fuel assemblies for PWR // Int. Conf. TopFuel 2006, Salamanca, 2006.
6. Перевезенцев, В. В. Возбуждение колебаний пучка ТВЭЛов реакторов ВВЭР турбулентным потоком теплоносителя / В. В. Перевезенцев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4. – С.78-88
7. Ikeno T., Kajishima T. Decay of swirling turbulent flow in rod-bundle, Journal of Fluid Science and Technology. 2006. P. 36-47.
8. Benhamadouche S., Moussou P., Maitre C.L. CFD estimation of the flow-induced vibrations of a fuel rod downstream of a mixing grid // Pressure Vessels and Piping: PVP 2009 ASME, Conference, Prague, Czech Republic, 2009.

9. Kim K.-T. The study on grid-to-rod wear models for PWR fuel, Nuclear Engineering and Design. 2009. P. 2820-2824.
10. Kim K.-T. A study on the grid-to-rod wear-induced fuel failure observed in the 16×16 KOFA fuel, Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 756-762.
11. Kim K.-T. The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod wear, Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 1886-1391.
12. Conner M.E., Baglietto E., Elmahdi A.M. Cfd methodology and validation for single-phase flow in pwr fuel assemblies. Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 2088-2095.
13. Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z. A new method to predict gridto-rod in a PWR fuel assembly inlet region. Nuclear Engineering and Design. 2011. P. 2974-2982.
14. Волков, В. Ю. Разработка теплогидравлической CFD модели реактора ВВЭР-1200 / В. Ю. Волков [и др.] // Материалы XII Международной научно-практической конференции STAR Russian Conference 2017 «Компьютерные технологии: решения прикладных задач теплопереноса и прочности», 31 мая-01 июня 2017 г., Нижний Новгород, 2017. – URL: <https://sapr.ru/anons/20170323-star-russian-conference-2017>.
15. Проскуряков, К. Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ / К. Н. Проскуряков // Москва : МЭИ, 1984. – 67 с.
16. Орлов, К. А. Программный комплекс «WaterSteamPro» для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара / К. А. Орлов, А. А. Александров, В. Ф. Очков, А. В. Очков // X Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ : тезисы докладов. – Казань : Бутлеровские сообщения, 2002. – С. 187-188.
17. Макаров, В. В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации / В. В. Макаров, А. В. Афанасьев, И. В. Матвиенко // Материалы научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск : ГИДРОПРЕСС, 2014.–URL:<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article56-ru.htm>.
18. Егоров, Ю. В. Экспериментальные исследования вибрации ТВЭЛов ТВС-2М и ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя в обоснование вибрационной прочности / Ю. В. Егоров // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов, ФГУП ОКБ «Гидропресс». – Подольск, 2016. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2013/documents/kms2013-002.pdf>

REFERENCES

- [1] Dolgov A.B., Chernikov O.G. Strategiya dvizheniya k nulevomu otkazu yadernogo topliva [Strategy of Movement to Zero Failure of Nuclear Fuel]. Doklad na Plenarnom zasedanii Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Bezopasnost`, e`konomika i e`ffektivnost` atomnoj otrasli» [Report at the Plenary Session of the International Scientific and Technical Conference «Safety, Economy and Efficiency of the Nuclear Industry»]. Moscow, may 25-27, 2016. URL : http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/Materials_2016/Plenar_rus/Strategiya_dvizheniya_k_nulevomu_otkazu_20_05_16.pdf (in Russian).
- [2] Tripoten E. Nulevoj otkaz kak ideologiya [Zero Failure as an Ideology]. Atomny`j e`kspert [Atomic Expert]. 2016. № 6 (48). P. 50-55 (in Russian).
- [3] Billerey A. Evolution of the fuel rod support under irradiation and it impacts on the mechanical behavior of the fuel assemblies, IAEA, Vienna, 2005.
- [4] Vallory J. Methodology of PWR fuel rod vibration and evaluation in HERMES Facilities, IAEA, Vienna, 2005.
- [5] Gottuso D., Canat J.N., Mollard P. A family of upgraded fuel assemblies for PWR // Int. Conf. TopFuel 2006, Salamanca, 2006.
- [6] Perevezencev V.V. Vozbuzhdenie kolebanij puchka TVE`Lov reaktorov VVE`R turbulenty`m potokom teplonositelya [The Excitation of Vibrations of the Fuel Rod Bundle of WWER Reactor a Turbulent Flow of Coolant]. Vestnik MGTU im. N. E`. Bauman. Ser. Mashinostroenie [Bulletin of Bauman MGTU. Engineering]. 2009. №4. C.78-88 (in Russian).
- [7] Ikeno T., Kajishima T. Decay of swirling turbulent flow in rod-bundle. Journal of Fluid Science and Technology. 2006. P. 36-47.
- [8] Benhamadouche S., Moussou P., Maitre C.L., CFD estimation of the flow-induced vibrations of a fuel rod downstream of a mixing grid // Pressure Vessels and Piping: PVP 2009 ASME, Conference, Prague, Czech Republic, 2009.
- [9] Kim K.-T. The study on grid-to-rod wear models for PWR fuel. Nuclear Engineering and Design. 2009. P. 2820-2824.

- [10] Kim K.-T. A study on the grid-to-rod wear-induced fuel failure observed in the 16×16 KOFA fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. P. 756-762.
- [11] Kim K.-T. The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod wear. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. P. 1886-1391.
- [12] Conner M. E., Baglietto E., Elmahdi A.M. Cfd methodology and validation for single-phase flow in pwr fuel assemblies. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. P. 2088-2095.
- [13] Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z. A new method to predict gridto-rod in a PWR fuel assembly inlet region. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. P. 2974-2982.
- [14] Volkov V.Yu., Golibrodo L.A., Krutikov A.A., Kudryavcev O.V., Nadinskij Yu.N., Skibin A.P. Razrabotka teplogidravlicheskoj CFD modeli reaktora VVE`R-1200 [Development of Thermohydraulic CFD Model of WWER-1200 Reactor]. *Materialy` XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii STAR Russian Conference 2017 «Komp`yuterny`e tekhnologii: resheniya prikladny`x zadach teplomassoperenosa i prochnosti» 31 maya-01 iyunya 2017 g., Nizhnij Novgorod [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference STAR Russian Conference 2017 «Computer Technologies: Solutions of Applied Problems of Heat and Mass Transfer and Strength», May 31-June 01, 2017, Nizhny Novgorod]. URL: <https://sapr.ru/anons/20170323-star-russian-conference-2017> (in Russian).*
- [15] Proskuryakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во vnutrikorpusny`x ustrojstvax YaE`U [Thermal-Hydraulic Excitation of Vibrations of the Coolant In-Vessel Devices of the Nuclear Power]. Moscow: MEI, 1984. 67 p. (in Russian).
- [16] Orlov K.A., Aleksandrov A.A., Ochkov V.F., Ochkov A.V. Programmny`j kompleks «WaterSteamPro» dlya rascheta teplofizicheskix svoystv vody` i vodyanogo para [Software Package "WaterSteamPro" for Calculation of Thermophysical Properties of Water and Steam]. X Rossijskaya konferenciya po teplofizicheskim svoystvam veshhestv : tezis` dokladov [X Russian Conference on Thermophysical Properties of Substances: abstracts]. Kazan`: Butlerovskie soobshheniya [Kazan: Butlerov Communications]. 2002. P. 187-188 (in Russian).
- [17] Makarov V.V., Afanas`ev A.V., Matvienko I.V. Modal`ny`j analiz maketov TVS reaktorov VVE`R pri silovom i kinematicheskom возбужdenii vibracii [Modal Analysis of Models of WWER reactor Fuel Assemblies at Power and Kinematic Excitation of Vibration]. *Materialy` nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Obespechenie bezopasnosti AE`S s VVE`R» [Materials of Scientific and Technical Conference «Safety of Nuclear Power Plants with WWER»]. Podolsk: GIDROPRESS. 2014. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article56-ru.htm> (in Russian).*
- [18] Egorov Yu.V. E`ksperimental`ny`e issledovaniya vibracii TVE`Lov TVS-2M i TVS-KVADRAT v potoke teplotnositya v obosnovanie vibracionnoj prochnosti [Experimental Studies of the Vibration of Fuel Rods FA-2M and FA-SQUARED in the Coolant Flow to Substantiate the Vibration Strength]. *Materialy` nauchno-tekhnicheskoy konferencii molody`x specialistov, FGUP OKB «Gidropress» [Materials of the Scientific and Technical Conference of Young Specialists, FSUE OKB «Gidropress»]. Podolsk. 2016. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2013/documents/kms2013-002.pdf> (in Russian).*

Use CFD Model of WWER-1200 Reactor for Prediction of Fuel Assemblies Vibrations

K.N. Proskuryakov¹, A.V. Anikeev², E. Afshar³, D.A. Pisareva⁴

«National Research University «MPEI», Moscow, Russia

¹ORCID ID: 0000-0002-1884-5576

Wos Researher ID: I-3583-2017

e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

²ORCID ID:0000-0001-6463-2328X

e-mail: Anikeev@mephi.ru

³ORCID ID: 0000-0002-1884-5576

e-mail: afshari@mpei.ru

⁴ORCID ID:0000-0002-6261-6973

e-mail: pisarevavi@yandex.ru

Abstract – The pare shoes the development cartogram of changes the natural frequencies of coolant pressure oscillation (NFCPO) in the reactor core to predict the conditions of growth the vibrations

of fuel assemblies (FA) for WWER-1200. Determination of the average temperature and pressure of the coolant in the core in the nominal mode is carried out by applying the known calculation results obtained using the thermo hydraulic three-dimensional CFD model of the WWER-1200 reactor. It is shown that the coincidence of the NFCPO with the frequency of vibrations of the FA is possible only at certain values of pressure and temperature of the coolant and vibration amplification occurs only in the temperature range corresponding to the bandwidth relative to the detected value of the NFCPO. It is shown that it is possible to increase flexural vibrations of FA-2M at different stages of reactor start-up.

Keywords: frequency, oscillations, reactor start-up, pressure, coolant, vibrations, wear.