
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.566.6, 621.874.7

**ОСОБЕННОСТИ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН ЭНЕРГОБЛОКОВ С РЕАКТОРАМИ
ВВЭР-1000**

© 2016 А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

В 2014-2015 гг. выполнен значительный объем работ по продлению срока эксплуатации машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива для энергоблоков Балаковской АЭС. В связи с пересмотром НТД (научно-технической документации) с момента ввода энергоблока в эксплуатацию, проведен глубокий анализ как собственно НТД, так и конструкторских и эксплуатационных документов. Выявлено отсутствие утвержденных методик продления срока эксплуатации для данного типа оборудования. Анализ документов показал, что машины сконструированы со значительным запасом сейсмостойкости и удовлетворяют пересмотренным НТД.

Поставлена исследовательская задача выявления основных повреждающих факторов и оценки остаточного ресурса с их учетом для механической части машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива.

Составлены и согласованы с разработчиками и эксплуатантами машин перегрузочных программы обследования индивидуально на каждую машину (и набор ТТО (текущего технического обслуживания), различающийся по энергоблокам).

С применением методов визуального и неразрушающего контроля проведен поиск повреждающих факторов. Обследование выявило отсутствие деградации металла, что позволило отбросить большинство факторов как не ограничивающих ресурс МП и ТТО. Для оценки остаточного ресурса выделен главный – циклическое нагружение.

Для оценки ресурса выбраны невосстанавливаемые элементы – металлоконструкции моста. Анализ циклической прочности позволил обосновать срок продления эксплуатации, равный первоначально назначенному – 30 лет.

По итогам работы сформулирована необходимость в разработке руководящего документа, регламентирующего продление срока эксплуатации механической части машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования для перегрузки топлива энергоблоков ВВЭР-1000.

Ключевые слова: атомная энергетика, АЭС, реактор, ВВЭР, перегрузка топлива, ППР (планово-предупредительный ремонт), ядерное топливо, машина перегрузочная, транспортно-технологическое оборудование, грузоподъемные механизмы, диагностика, обследование, продление ресурса.

Поступила в редакцию 15.03.2016 г.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Рассматривая даты ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС, несложно заметить, что в 2016-2024 гг. истекает назначенный срок службы у четырех российских, шести украинских и двух болгарских реакторов ВВЭР-1000. Подходит к концу и срок службы оборудования энергоблоков, строительство которых началось в 1980-е годы, а

завершилось только в 1990-е или 2000-е. Для эксплуатирующих организаций остро стоит задача провести работы по продлению срока эксплуатации (далее – ПСЭ) и получить лицензии на срок продления. Лицензирование включает в себя большой объем работ по оценке остаточного ресурса оборудования, в число которого входят и те устройства, которые используют для перегрузки топлива:

- машины перегрузочные (далее – МП), изображенные на рис. 1;
- захваты: чехлов, кластера, кассеты;
- устройства для транспортировки шахты, платформы ВБ и БЗТ;
- гидрозатворы скользящие;
- кантователи;
- пеналы герметичные и пеналы системы обнаружения дефектных сборок;
- другое транспортно-технологическое оборудование (далее – ТТО).



Рис. 1. – Машина перегрузочная МПС-В-1000 энергоблока ВВЭР-1000

В 2014 году перед НИИ АЭМ встала задача об обосновании продления срока эксплуатации более чем 25 единиц такого оборудования (включая две МП) на энергоблоках №№1 и 2 Балаковской АЭС. Первой же проблемой, с которой пришлось столкнуться, оказалось отсутствие утвержденных методик ПСЭ на большинство разновидностей оборудования, подвергаемого обследованию.

Нельзя сказать, что отсутствие полное – так, например, ПСЭ системы управления МП осуществляется по руководящему документу РД ЭО 0319-01 «Методика и программа оценки технического состояния и остаточного ресурса системы управления механизмами перегрузочной машины МПС-В-1000-ЗУ4 для АЭС с реакторами ВВЭР-1000». Вместе с тем (для металлоконструкций моста и тележки, рабочей штанги, ТТО) объем контроля, выбор главных повреждающих факторов, выбор предельного состояния и методики расчета остаточного ресурса остаются в зоне ответственности исполнителя работ. Ограничениями при этом служат в основном такие основополагающие документы, как [1, 2, 3].

Таким образом, оказалось возможным поставить исследовательскую задачу о выявлении основных повреждающих факторов и оценке остаточного ресурса с их учетом для ТТО и механической части МП.

В отсутствие необходимых нормативно-технических документов обследование и обоснование остаточного ресурса должно проводиться по индивидуально разработанной программе. Разработанные для обоих энергоблоков программы имели следующие особенности:

а) Учитывая сложность и ответственность оборудования, для программ предусмотрели широкий круг согласования, включающий проектантов АЭС и реакторной установки, эксплуатирующую организацию, разработчиков МП, головную материаловедческую организацию.

б) Программы предусматривали тщательный анализ эксплуатационной документации, включая: все сведения о ремонтах и модернизациях МП и ТТО, графиков и протоколов испытаний.

в) Программы учитывали, что штрафы являются сосудами по ПНАЭ Г-7-008-89 [4], а прочее оборудование относится к грузоподъемному по НП-043-11 [5].

г) В обязательном порядке предписывались нивелировка и тщательный осмотр рельсовых путей с предъявлением требований, аналогичных их заводским требованиям по дефектации.

д) Программы содержали требования к функциональной диагностике, то есть проверке работоспособности обследуемого оборудования.

е) Программы не предусматривали конкретный выбор главного повреждающего фактора и предельного состояния – это предполагалось сделать после осмотра и неразрушающего контроля оборудования.

На момент составления программы предполагались следующие пути возможного разрушения оборудования:

- коррозионный и (или) эрозионный износ;
- деградация конструкционных материалов под действием ионизирующих излучений;
- накопление усталостных повреждений под циклической механической нагрузкой.

2. АНАЛИЗ ДОКУМЕНТАЦИИ

Многие НТД с момента ввода энергоблока в эксплуатацию были пересмотрены, поэтому потребовался глубокий анализ как собственно НТД, так и конструкторских, и эксплуатационных документов.

3. ОБСЛЕДОВАНИЕ

Ни одному из путей к разрушению, перечисленных в ч. 1, до проведения обследования не представляется возможным отдать предпочтение, чтобы назвать основным повреждающим фактором. Этим обусловлен и выбор методов контроля.

Для выявления видимых дефектов, которые

– могут влиять на циклическую прочность оборудования и/или надежность его работы;

– делают оборудование неработоспособным,

предусмотрен *визуально-измерительный контроль* для всех элементов МП и ТТО, доступных для осмотра, в объеме не менее, чем требуется инструкцией по дефектации извода-изготовителя. Для крановых путей (моста МП, тележки МП и тележки токоподвода моста) предусмотрено геодезическое обследование.

Для определения деградации физико-механических свойств металла МП и ТТО предусмотрены *замеры твердости*. Следует заметить, что если снижение твердости говорит об ухудшении свойств сопротивления кратковременному разрушению, то рост твердости является свидетельством радиационного охрупчивания, ухудшающего

циклическую прочность.

Для выявления коррозионно-эрозионного износа применяется *ультразвуковая толщинометрия*. Результаты замеров подлежали сравнению с конструкторскими значениями толщины элементов. Кроме того, расчет на прочность на этапе эксплуатации в соответствии с руководящим документом [2] выполняется также по фактическим значениям толщины.

Для оценки работоспособности элементов МП и ТТО предусмотрена функциональная диагностика. Для элементов, которые имеют документированные инструкции по функциональной диагностике, рекомендуется придерживаться этих инструкций. Для всех остальных на основе технических условий и инструкций по эксплуатации разработаны индивидуальные процедуры, при которых контролируется состояние подвижных деталей, легкость их перемещения, надежность фиксации, работа сигнальных механизмов и т.п.

Для выполнения требования [4] для пеналов герметичных и пеналов СОДС предусмотрены гидроиспытания на прочность и плотность. Однако при анализе документов выяснилось, что пеналы регулярно подвергаются гидроиспытаниям без нарушений от установленного порядка. Можно заключить, что прочность и плотность пеналов обеспечены и регулярно контролируются.

4. АНАЛИЗ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Сейсмостойкость оборудования, выполняющего ядерно-опасные операции по транспортировке отработанного ядерного топлива, заслуживает подробного рассмотрения. Авария на АЭС Фукусима в 2011 году показала, насколько опасной может быть недооценка внешних экстремальных воздействий при проектировании. При этом с 2002 года в России введены актуальные нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01 [6], после чего на всех АЭС была проведена кампания по проверке соответствия расчетных нагрузок требованиям этих вновь принятых норм. На Балаковской АЭС в 2006 году ФГУП «Атомэнергопроект» актуализировал сейсмические нагрузки, выдав новые спектры нагрузок. Для отметки размещения МП (+41,4м) они приведены на рисунке 2.

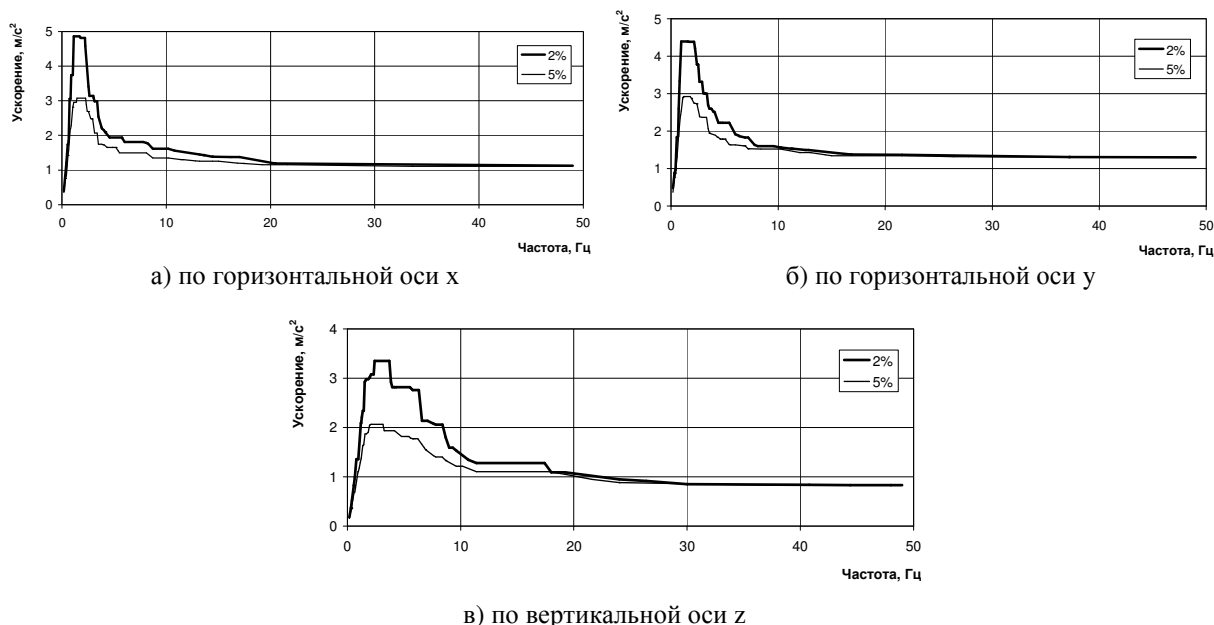


Рис. 2. – Спектры сейсмической нагрузки при МРЗ на отметке размещения МП

Учитывая, что МП и ТТО, размещаемые на данной отметке, рассчитывались производителем на нагрузку со спектром, приведенным на рисунке 3, можно провести сопоставление и сделать вывод о сейсмостойкости МП и ТТО современным нормам.

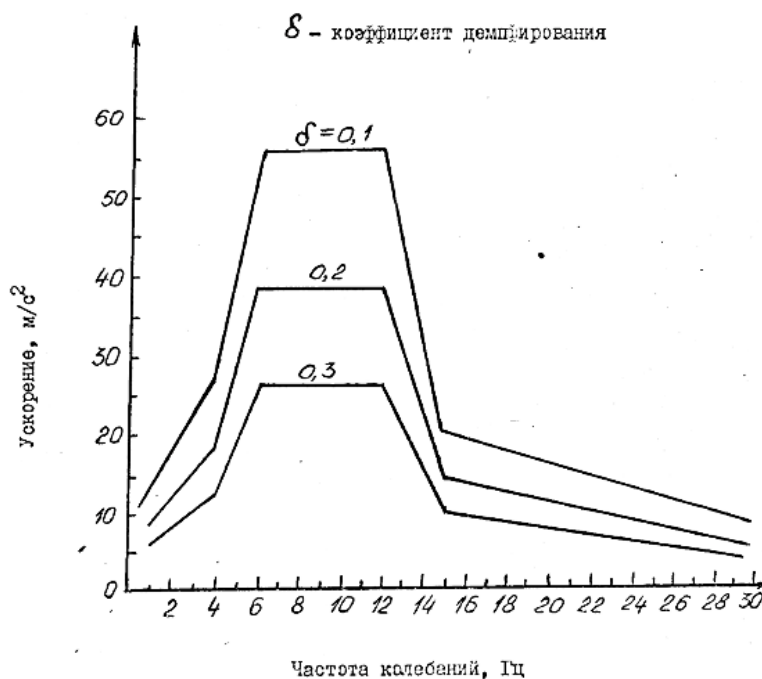


Рис. 3. – Расчетный спектр сейсмической нагрузки при МРЗ 9 баллов для МП и ТТО [7,8]

5. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Обследование МП и ТТО энергоблоков Балаковской АЭС в соответствии с пп. 1-4 показало, что оборудование в основном находится в работоспособном состоянии. Визуально-измерительный контроль позволил выявить элементы, подвергшиеся механическому износу и деформации. Один из захватов чехла по результатам замеров его искривления рекомендован к ремонту или замене.

Для проведения неразрушающего контроля, в частности, замеров твердости, в соответствии с национальными нормами, удовлетворительно подходит использование компактных ручных твердомеров [9]. Замеры толщины и твердости металла не выявили ни деградации свойств металла (снижения прочности, охрупчивания), ни коррозионного или эрозионного износа. Таким образом, методом исключения, а также учитывая опыт НИИ АЭМ [10] в качестве повреждающего фактора, ограничивающего ресурс МП и ТТО, было признано циклическое нагружение. Соответствующим предельным состоянием для этого фактора является образование усталостных макротрещин.

Условие прочности металла МП и ТТО для данного предельного состояния может быть записано в соответствии с Нормами [7]:

$$a = \sum_i \frac{N_i}{[N_i]} \leq [a],$$

где a – накопленная циклическая повреждаемость,

N_i – число циклов i -го вида, которые рассчитываемое изделие должно отработать за весь срок службы;

$[N_i]$ – допускаемое число циклов данного вида;
 $[a]=1$ – допускаемая циклическая повреждаемость.

Для расчета N_i требуется вся доступная информация о фактически отработанных циклах для каждого элемента оборудования. Для этого совместно с цехом-владельцем оборудования был проведен анализ его работы за прошедший срок эксплуатации. Для всех элементов было подсчитано число циклов нагружения и выписана справка соответствующего содержания. Анализ позволил также выявить число циклов нагружения за один ППР энергоблока – это позволило перевести результаты расчета на прочность из допускаемого числа циклов в допускаемое число ППР.

Расчет на прочность на этапе эксплуатации выполняется по фактическим свойствам металла [2] (толщина и твердость). Для перевода твердости в нормативные механические свойства, соответствующие Нормам расчета на прочность (временное сопротивление R_m) используют методику РД ЭО 0027-2005 [10]. Временное сопротивление углеродистой стали конструкции моста рассчитывают по формуле таблицы 6 [11]:

$$R_m = 103 + 2,66HB + 0.00088HB^2$$

Условный предел текучести $R_{0,2}$ принимается в соответствии с техническими условиями на материал или по Нормам расчета на прочность [7].

Для расчета циклической прочности была построена упрощенная модель металлоконструкции моста (см. рис. 4), к которой приложили весовые нагрузки. В качестве самого тяжелого цикла нагружения был принят следующий. Исходное и конечное состояния – тележка не нагружена, находится у края моста. Промежуточное состояние – тележка нагружена весом ТВС и находится в середине моста.

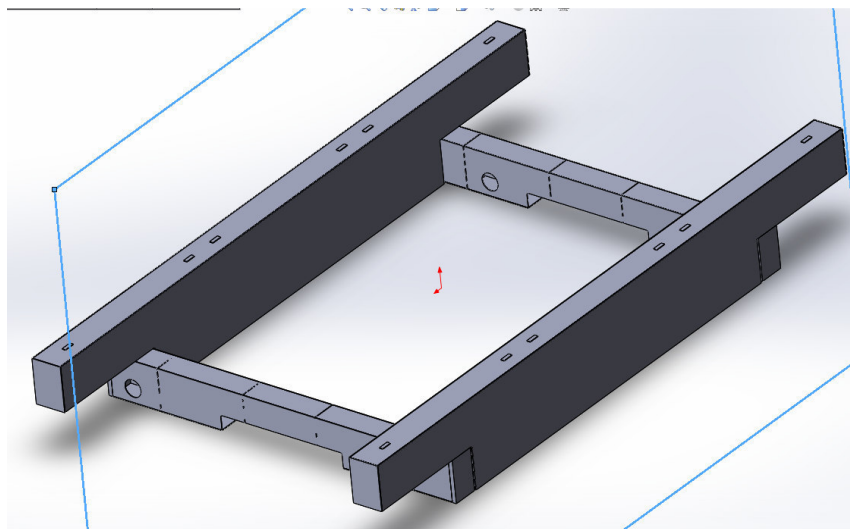


Рис. 4. – Расчетная модель металлоконструкции моста

Расчет напряженных состояний был выполнен методом конечных элементов в программном коде Zenit-95. Амплитуда напряжений цикла определялась как наиболее опасный из результатов поузлового вычитания начального и промежуточного, начального и конечного или промежуточного и конечного состояний. Допускаемое число циклов было определено по стандартной методике [7, разд. 5] с применением кривой усталости (см. рис. 5).

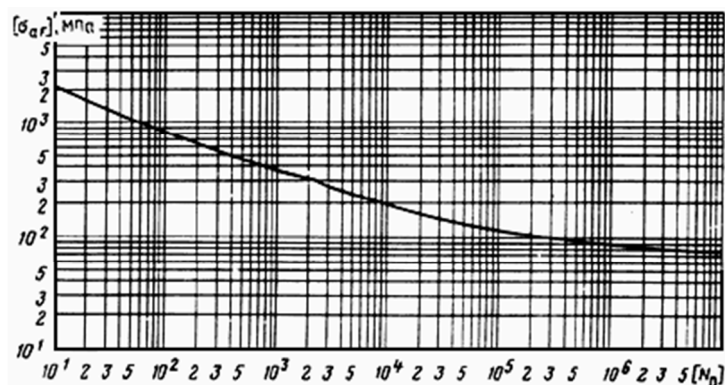


Рис. 5. – Кривая усталости стали перлитного класса [7]

Чтобы перевести полученное число циклов нагружения в календарные сроки ПСЭ, совместно с ОЯБиН (отдел ядерной безопасности и надежности) был выполнен анализ, позволивший рассчитать средний и минимальный (с заданной доверительной вероятностью) интервал времени между ППР энергоблока. Таким образом, удалось сделать вывод о том, что остаточного ресурса хватает для продления срока эксплуатации не менее, чем на 50 ППР, что означает в среднем 75 и не менее 30 лет эксплуатации.

Для дальнейшего упрощения процедур ПСЭ перспективным представляется создание интеллектуальной системы по обследованиям и ремонтам машин перегрузочных, эксплуатируемых на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, в соответствии с подходом, описанным в [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа позволяет утверждать, что:

- имеется необходимость в составлении руководящего документа по продлению срока эксплуатации машин перегрузочных МПС-В-1000 с транспортно-технологическим оборудованием;
- за 30 лет нормальной эксплуатации металлоконструкций машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования в условиях энергоблоков ВВЭР-1000 металл не испытывает деградации свойств. Основным повреждающим фактором является циклическое механическое нагружение;
- расчетный остаточный ресурс основных металлоконструкций МП достаточен для выполнения еще не менее 50 ППР энергоблока и позволяет продлить срок эксплуатации еще на 30 лет;
- по результатам обследования могут быть приняты решения о продлении эксплуатации МП и ТТО на 30 лет и откорректированы мероприятия по управлению ресурсными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 1.1.1.01.007.0281-2010. Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций [Текст].
2. РД ЭО 0330-2001. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации [Текст].
3. СТО 1.1.1.01.006.0327-2008. Продление срока эксплуатации блока атомной станции [Текст].
4. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст].

5. НП-043-11. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии [Текст].
6. НП 031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций [Текст].
7. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст].
8. ТУ 108.1361-85. Машина перегрузочная МПС-В-1000 3У4.2. [Текст]
9. Aslanyan E.G. Metrological facilities for measuring hardness // Measurement Techniques. 2005, Vol. 48, №1, pp. 57–63.
10. Адаменков, К.А. и др. Опыт проведения работ по обследованию технического состояния и оценке остаточного ресурса машин перегрузочных типа МПС-В-1000-3У4.2. [Текст] / К.А. Адаменков, В.Н. Никифоров, Д.В. Сиротин и др. // Тез. докл. II всерос. науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. Подольск, 19-23 ноября 2001 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2001. – С. 117–118.
11. РД ЭО 0027-2005. Руководящий документ. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости [Текст].
12. Kuznetsov K.A. Methods, models, and means of increasing the efficiency of the estimation of the technical conditions and residual operation life of technical devices // Journal of machinery manufacture and reliability. 2014, Vol. 43, №6, ISSN 1052-6188, DOI: 10.3103/S1052618814060053, pp. 497-502.

REFERENCES

- [1] STO 1.1.1.01.007.0281-2010. Upravlenie resursnymi kharakteristikami elementov energoblokov atomnykh stantsiy [STO 1.1.1.01.007.0281-2010. Control of resource characteristics of elements of power units of nuclear power plants]. (in Russian)
- [2] РД ЭО 0330-2001. Rukovodstvo po raschetu na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov reaktornykh ustanovok RBMK, VVER i EGP na stadii ekspluatatsii [RD EO 0330-2001. A manual by calculation on durability of the equipment and pipelines of reactor installations of RBMK, PWR and EGP at an operation stage]. (in Russian)
- [3] STO 1.1.1.01.006.0327-2008. Prodlenie sroka ekspluatatsii bloka atomnoy stantsii [STO 1.1.1.01.006.0327-2008. Extension of period of operation of the unit of nuclear power plant]. (in Russian)
- [4] ПНАЭ Г-7-008-89. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [PNAE G-7-008-89. Rules for the Construction and Safe Operation of the equipment and pipelines of atomic power stations]. (in Russian)
- [5] НП-043-11. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzopodemnykh kranov dlya obektov ispolzovaniya atomnoy energii [NP-043-11. Rules for the Construction and Safe Operation of load-lifting easels for objects of use of atomic energy]. (in Russian)
- [6] НП 031-01. Normy proektirovaniya seysmostoykikh atomnykh stantsiy [NP-043-11. Rules for the Construction and Safe Operation of load-lifting easels for objects of use of atomic energy].
- [7] PNAE G-7-002-86. Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [PNAE G-7-002-86. Norms of calculation on durability of the equipment and pipelines of atomic power stations]. (in Russian)
- [8] ТУ 108.1361-85. Mashina peregruzochnaya MPS-V-1000 3У4.2. [TU 108.1361-85. Machine overload MPS-V-1000 3U4.2.]. (in Russian)
- [9] Aslanyan E.G. Metrological facilities for measuring hardness. Measurement Techniques. 2005, №1, ISSN 0543-1972, DOI: 10.1007/s11018-005-0100-6, pp. 57–63. (in English)
- [10] Adamenkov K.A., Nikiforov V.N., Sirotnin D.V. etc. Opyt provedeniya rabot po obsledovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke ostatochnogo resursa mashin peregruzochnykh tipa MPS-V-1000-3U4.2. [Experience of work on survey of technical condition and an assessment of a residual resource of machines overload the MPS-V-1000-3U4.2 type.] Tezisy dokladov II vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER» [Theses of the report of the II All-Russian scientific and technical conference "Safety of the NPP with PWR"], Podolsk, 19-23 noyabrya 2001 [November, 19-23, 2001]. Podolsk. Pub. ОКБ «Гидропресс» [Experimental design bureau "Hydraulic press"], 2001, pp. 117–118. (in Russian)
- [11] РД ЭО 0027-2005. Rukovodyashchiy dokument. Instruksiya po opredeleniyu mekhanicheskikh svoystv metalla oborudovaniya atomnykh stantsiy bezobraztsovymi metodami po kharakteristikam tverdosti [RD EO 0027-2005. The leading document. The instruction for determination of mechanical properties of metal of the equipment of nuclear power plants by bezobraztsovy methods

according to characteristics of hardness] (in Russian)

- [12] Kuznetsov K.A. Methods, models, and means of increasing the efficiency of the estimation of the technical conditions and residual operation life of technical devices. Journal of machinery manufacture and reliability. 2014, Vol. 43, №6, ISSN 1052-6188, DOI: 10.3103/S1052618814060053, pp. 497-502. (in English)

Operation Extension Features of Overload Machines of PWR-1000 Reactors Power Units

A.A. Lapkis, V.N. Nikiforov, O.Yu. Pugacheva

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of
National Research Nuclear University «MEPhI»,
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
e-mail: nii_energomash@mail.ru*

Abstract – The considerable amount of works on machine operation extension of overload and transport technology equipment of fuel overload is made for Balakovo NPP in 2014-2015. Due to the revising STD (scientific and technical documentation) from the moment of power unit input in operation, the deep analysis of STD, designer and operational documents is carried out. Absence of the approved techniques of operation extension for this type of the equipment is revealed. The document analysis showed that machines are constructed with the considerable inventory of seismic stability and satisfy with STD.

The research task of detection of the main faulting factors and residual resource assessment with their account for machine mechanical part of overload and transport technology equipment of fuel overload is set.

Programs of survey on each machine are made individually and agreed with developers and operators of overload machines (and the set of COM (current operating maintenance) differing on power units).

Search of faulting factors is carried out using methods of visual and non-destructive testing. Survey revealed absence of degradation of metal that allowed to discard the majority of factors as not limiting the overload machines and COM resource. For an assessment of a residual resource main ones as cyclic loading is selected.

A bridge metalwork are selected to be nonrestorable elements for an assessment of a resource . The analysis of cyclic durability allowed to justify period of extension of operation, equal originally to assigned – 30 years.

Need for development of the leading document regulating extension of operation period of mechanical part of overload machines and transport technology equipment for overload of PWR-1000 fuel is formulated following the results of operation.

Keywords: nuclear power, NPP, reactor, PWR, fuel overload, SPM (scheduled preventive maintenance), nuclear fuel, overload machine, transport technology equipment, load-lifting mechanisms, diagnostics, survey, resource extension.