**УДК 621.039.56**

**О.Л. Ташлыков,** канд. техн. наук, доц.,
**С.Е. Щеклеин,** д-р техн. наук, проф.,
Урал. федерал. ун-т, г. Екатеринбург, Россия,
**А.А. Кадников,** канд. техн. наук, ОАО "Атомэнергоремонт", г. Москва, Россия

# ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗОВЫХ ЗАТРАТ В ПРОЦЕССЕ ГЛУБОКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ БЛОКОВ АЭС С ЦЕЛЬЮ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ЗАМЕНЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПГВ-1000)

*О.Л. Ташликов, С.Є. Щеклеїн, А.А.Кадніков.* **Оптимізація дозових затрат в процесі глибокої модернізації блоків АЕС з метою продовження терміну експлуатації ( на прикладі заміни парогенераторів ПГВ-1000).** Показано необхідність проведення глибокої (цільової) модернізації енергоблоків АЕС, споруджених за раніш діючими нормами і правилами, для підвищення безпеки до відповідного рівня і забезпечення ресурсних характеристик обладнання й елементів в період додаткового терміну експлуатації. Проведено оцінку ефективності основних заходів щодо зниження працезатрат і опромінюваності ремонтного персоналу на окремих етапах планування, організації і проведення робіт по заміні парогенераторів АЕС з ВВЕР-1000. На основі проведеного аналізу радіаційної обстановки в різних місцях робочої зони і трудомісткості окремих операцій розроблено заходи щодо оптимізації дозових затрат при заміні парогенераторів.
*Ключові слова*: дозові витрати, γ-випромінювання, АЕС, ремонт обладнання, парогенератор.

*О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.А. Кадников.* **Оптимизация дозовых затрат в процессе глубокой модернизации блоков АЭС с целью продления срока эксплуатации (на примере замены парогенераторов ПГВ-1000).** Показана необходимость проведения глубокой (целевой) модернизации энергоблоков АЭС, сооруженных по ранее действовавшим нормам и правилам, для повышения безопасности до соответствующего уровня и обеспечения ресурсных характеристик оборудования и элементов в период дополнительного срока эксплуатации. Проведена оценка эффективности основных мероприятий по снижению трудозатрат и облучаемости ремонтного персонала на отдельных этапах планирования, организации и проведения работ по замене парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000. На основании проведенного анализа радиационной обстановки в различных местах рабочей зоны и трудоемкости отдельных операций разработаны мероприятия по оптимизации дозовых затрат при замене парогенераторов.
*Ключевые слова*: дозовые затраты, γ-излучение, АЭС, ремонт оборудования, парогенератор.

*O.L. Tashlykov, S.Ye. Shcheklein, A.A. Kadnikov.* **Optimization of dosimetric costs during the drastic NPP units modernization to prolong the operation life (on the example of PGV-1000 steam generators replacement).** It is shown that drastic (target) modernization of NPP units constructed under the old rules is necessary to increase the safety to the proper level and to ensure the resource characteristics of the equipment during the period of additional service life. The estimation of effectiveness of main measures for reducing labor input and maintenance personnel irradiation on the separate stages of planning, organizing and running of the steam generators on VVER-1000 NPP replacement is made. The measures of dosimetric costs optimization during the steam generators change are worked out on the basis of the implemented analysis of the radioactive environment in different places of work area and the labor costs of separate operations.
*Keywords*: dosimetric costs, γ-radiation, NPP, repair of the equipment, steam generator.

Продление сроков эксплуатации энергоблоков действующих АЭС после исчерпания назначенного срока службы является одной из актуальных задач на современном этапе развития атомной энергетики России. По состоянию на 1 ноября 2011 г. выполнены работы по продлению сроков эксплуатации 17 энергоблоков АЭС суммарной установленной мощностью 9748

© Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Кадников А.А., 2012

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

МВт: №№ 3, 4 (ВВЭР-440), 5 (ВВЭР-1000) Нововоронежской; №№ 1, 2, 3 Кольской (ВВЭР-440); №№ 1...4 Ленинградской (РБМК-1000); №№ 1, 2 Курской (РБМК-1000); №№ 1...4 Билибинской АС (ЭГП-6); № 3 Белоярской (БН-600). В период с 2012 по 2015 гг. предстоит продлить на 15…30 лет. Срок эксплуатации шести энергоблоков АЭС второго поколения на 15…30 лет: № 1 Калининской (ВВЭР-1000), № 4 Кольской (ВВЭР-440), № 4 Курской (РБМК-1000), № 1 Балаковской (ВВЭР-1000), №№ 1, 2 Смоленской (РБМК-1000) суммарной установленной мощностью 5440 МВт [1].

Для повышения уровня безопасности до показателей, соответствующих требованиям отечественных нормативных документов и рекомендациям МАГАТЭ для АЭС, сооруженных по ранее действовавшим нормам и правилам, а также обеспечения ресурсных характеристик оборудования и элементов в период дополнительного срока эксплуатации энергоблока АЭС должна быть проведена глубокая (целевая) модернизация.

Парогенераторы являются наиболее повреждаемым теплообменным оборудованием первого контура энергоблоков АЭС с водо-водяными реакторами. За рубежом на АЭС с PWR* к 2010 году уже заменено более 200 парогенераторов из почти 500 действующих. Замена парогенераторов на АЭС с PWR проводится из-за повреждений теплообменных труб. На АЭС с ВВЭР-1000 в 1987…1992 гг. 34 парогенератора были заменены из-за повреждения коллекторов в районе перфорации. После выяснения причин повреждений и выполнения комплекса мер подобных случаев разрушения не встречалось. В последние годы основным элементом, определяющим фактический срок службы парогенераторов на АЭС с ВВЭР, являются теплообменные трубы. В 1999…2004 гг. шесть ПГВ-1000 были заменены по причине коррозионного повреждения металла теплообменных труб [2].

Для продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 сверх проектного, а в ряде случаев для обеспечения проектного срока службы, необходима замена парогенераторов, требующая трудоемких и дорогостоящих работ со значительными дозовыми нагрузками на персонал.

В результате проведенного анализа фактологических данных по проведению кампаний по замене 38 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 установлена связь производственных, организационных, радиационных факторов и перепростоя энергоблоков АЭС и, как следствие, снижения коэффициента использования установленной мощности. Проведена оценка эффективности основных мероприятий по снижению трудозатрат и облучаемости ремонтного персонала на отдельных этапах планирования, организации и проведения работ по замене парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000, сформулированы предложения по оптимизации дозовых затрат.

Для выявления этапов работ, требующих оптимизации дозовых затрат, и выбора способа снижения облучаемости персонала необходимо сопоставить данные по радиационной обстановке в различных местах рабочей зоны и трудоемкость выполнения отдельных операций при замене парогенераторов.

Рассмотрим в качестве примера результаты проведенного подробного анализа радиационной остановки снаружи, внутри корпуса и в коллекторах теплоносителя более 30-ти парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000, использованные в выработке рекомендаций по оптимизации дозовых затрат при заменах парогенераторов [3].

Мощность дозы γ-излучения снаружи ПГ составляет в среднем 0,01…0,02 мкЗв/с, максимальное значение — 0,03 мкЗв/с. Заполнение водой снижает мощность дозы незначительно (на 10…12 %).

Радиационные поля внутри парогенератора со стороны второго контура более значительны. В среднем мощность дозы γ-излучения составляет 1…1,5 мкЗв/с, максимальные значения наблюдаются в районах гибов теплообменных труб и достигают 2,5 мкЗв/с. Однако данное пространство не представляет интереса с точки зрения оптимизации радиационной защиты при

*PWR — Pressurized Water Reactor (реактор с водой под давлением) — аналог отечественного реактора типа ВВЭР

замене парогенераторов, так как технологический процесс замены практически не предусматривает работ внутри парогенераторов со стороны второго контура.

Особый интерес представляет распределение мощности дозы γ-излучения внутри коллекторов теплоносителя. В данной зоне производится значительный объем работ при замене парогенераторов. Как следует из графика (рис. 1), во внутреннем пространстве коллекторов теплоносителя мощность дозы γ-излучения в зоне вальцовки теплообменных труб и соединения коллекторов ПГ с главными циркуляционными трубопроводами составляет 1…1,5 мкЗв/с, а в ПГ-1 — 3…4,5 мкЗв/с. Такое двух-, трехкратное отличие радиационной обстановки в одном (иногда в двух) парогенераторе реакторной установки от других наблюдается практически во всех проанализированных фактологических данных по радиационной обстановке на различных АЭС.

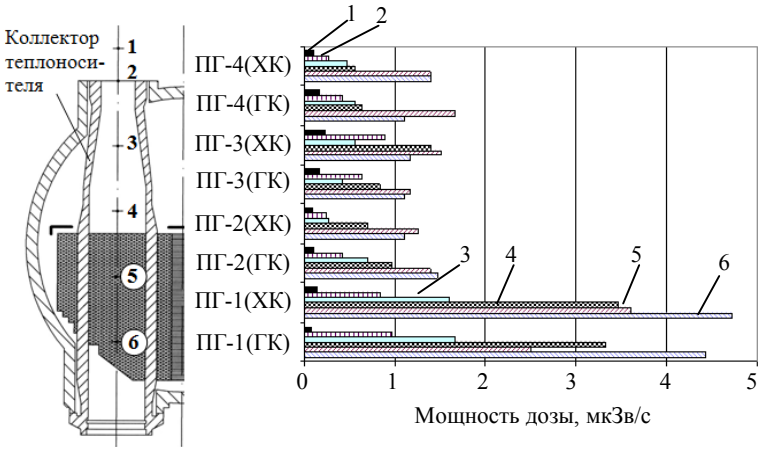


*Рис. 1. Распределение мощности дозы излучения внутри коллекторов теплоносителя: ХК — холодный коллектор; ГК — горячий коллектор; 1….6 — точки контроля*

Эти данные по радиационной обстановке и значительные трудозатраты на резку соединений коллекторов ПГ с главными циркуляционными трубопроводами (ГЦТ) и обработку кромок (на один ПГ — 3874,5 чел·ч), сварку ГЦТ с коллекторами, включая полировку, зачистку, наплавку, термообработку и контроль (13083 чел·ч), определяют значительные коллективные дозы облучения, и возникает необходимость максимально возможного снижения мощности дозы γ-излучения [4].

Как показала практика работ по замене парогенераторов ПГВ-1000 [4, 5] дезактивация ПГ и главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) не дает необходимого эффекта в наиболее напряженной рабочей зоне — районе сварного соединения коллекторов парогенератора с ГЦТ. Так, во время замены парогенераторов на втором блоке Балаковской АЭС в 1999...2000 гг. уровень γ-излучения внутри и у кромок ГЦТ достигал 2 мкЗв/с, вследствие чего ведущие специалисты (сварщики, труборезчики, термисты, дефектоскописты) достигли контрольного уровня в 20 мЗв до начала работ на “чистых” трубопроводах.

Использование биологической защиты, применявшейся на предыдущих заменах ПГ, при наиболее дозозатратных работах по обработке кромок, стыковке и заварке ГЦТ, снижало мощность дозы γ-излучения всего в 2…2,5 раза, и дозозатраты были значительными (рис. 2).

При замене ПГ в 1999…2000 гг. на блоке № 2 Балаковской АЭС для коллекторов ПГВ-1000 была использована новая биологическая защита, спроектированная и изготовленная в ОАО “Атомэнергоремонт”, которая позволила значительно снизить дозы облучения при наиболее дозозатратных работах (при всех предшествовавших заменах, начиная с Южно-Украинской АЭС в 1987 г.) по восстановлению наплавки внутри ГЦТ до 63,9 чел·мЗв (в сумме на восьми стыках) [6].

В целом коллективная доза при замене парогенераторов (рис. 3) составила около 900 чел·мЗв, что значительно ниже проектного значения — 1200 чел·мЗв.

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

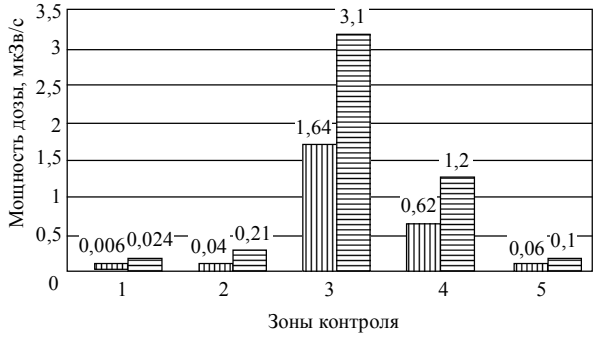


*Рис. 2. Радиационная обстановка при замене парогенераторов на энергоблоке № 2 Балаковской АЭС: 1 — помещение (бокс) парогенераторов; 2 — пространство снаружи парогенераторов; 3 — внутреннее пространство ГЦТ до установки защиты; 4 — внутреннее пространство ГЦТ после установки защиты; 5 — внутреннее пространство ГЦТ с использованием специальной защиты; минимальное (▥) и максимальное (▤) значения*

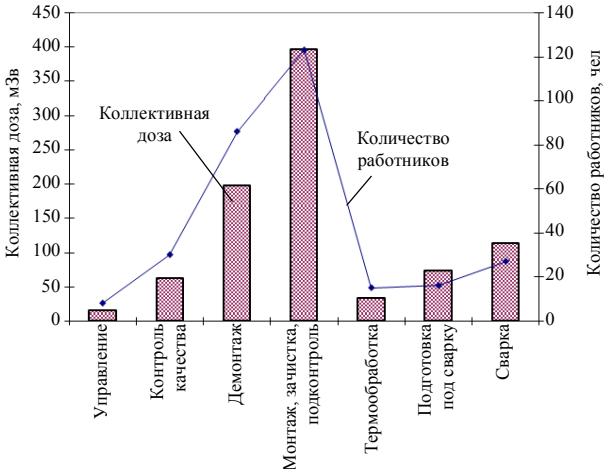


*Рис. 3. Коллективная доза при замене парогенераторов на энергоблоке № 2 Балаковской АЭС в 1999…2000 гг.*

Для оптимизации дозовых затрат при последующих заменах парогенераторов и решения проблемы минимизации облучаемости персонала сформулирован ряд предложений и технических решений при замене ПГ, проведены исследования по освоению более эффективной технологии дезактивации коллекторов теплоносителя и примыкающих к ним ГЦТ — ультразвуковой.

Из соображения оптимальной продолжительности работ по замене ПГ возможны два варианта проведения ультразвуковой дезактивации коллекторов ПГ и ГЦТ:

— дезактивация до отрезки трубопроводов от коллекторов парогенератора. В этом случае дезактивирующее устройство устанавливается на фланец коллектора первого контура;

— дезактивация после отрезки трубопроводов от коллекторов парогенератора. В этом случае дезактивирующее устройство закрепляется на ГЦТ $Д_у$850 с помощью стяжки или другого фиксирующего приспособления.

Дезактивация трубопроводов $Д_у$850 производится на глубину не менее 1,5 м от плоскости реза.

Исходя из изложенного, можно сделать выводы:

— при принятии решения о целесообразности продления срока эксплуатации рассматриваемого энергоблока АЭС необходимо соблюдать принцип обоснования, проводить оценку и оптимизацию дозовых затрат на целевую модернизацию;

— современный подход заключается в использовании математических методов моделирования пространственных радиационных полей и дозовых нагрузок при проведении модернизации соответствующего оборудования АЭС.

**Литература**

1. Дементьев, А. Планирование — основа развития. Система целевого планирования производственно-технической деятельности / А. Дементьев // Росэнергоатом. — 2011. — № 11. — С. 22 — 27.
2. Ташлыков, О.Л. Анализ повреждаемости парогенераторов, обогреваемых водой под давлением, с точки зрения контролируемого продления ресурса до замены парогенераторов / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.А. Кадников // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2007. — № 4. — С. 93 — 102.

3. Ташлыков, О.Л. Методы оценки и снижения дозовых нагрузок при ремонте АЭС / О.Л. Ташлыков: учеб. пособие. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. — 118 с.
4. Ташлыков, О.Л. О проблеме продления ресурса и замене парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-1000 / О.Л. Ташлыков, А.А. Кадников // Перспектив. энергет. технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров: Сб. науч. тр. — Екатеринбург, ООО ИД "Урал Юр Издат", — 2006.— С. 36 — 46.
5. Кадников, А.А. Оптимизация работ по замене парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 / А.А. Кадников, О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин // Безопасность, эффективность и экономика атом. энергетики: тез. докл. пятой международной науч.техн. конф 19 — 21 апреля 2006 г. — Москва, — 2006. — С. 141 — 143.
6. Ташлыков, О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация моногр. / О.Л. Ташлыков: — Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011. — 232 с.

**References**

1. Dementyev A. Planirovanie — osnova razvitiya. Sistema tselevogo planirovaniya proizvodstvenno-tekhnicheskoy deyatel'nosti [Planning as the Basis of Development. The System of Target Planning of Production and Technical Activity] / A.Dementyev // Rosenergoatom. — 2011. # 11. pp. 22 — 27.
2. Tashlykov O.L. Analiz povrezhdaemosti parogeneratorov, obogrevaemykh vodoy pod davleniem, s tochki zreniya kontroliruemogo prodleniya resursa do zameny parogeneratorov [The Pressurized Water Heated Steam Generators Damageability Analysis in terms of the Controlled Lifetime Prolongation Till the Replacement] / O.L.Tashlykov, S.Ye.Shcheklein, A.A. Kadnikov // News of Higher Schools. Nuclear Power Engineering — 2007. # 4. pp. 93 — 102.
3. Tashlykov O.L. Metody otsenki i snizheniya dozovykh nagruzok pri remonte AES [Methods for Estimating and Reducing Dosimetric Costs during the NPP Repair] / O.L.Tashlykov: Tutorial. Ekaterinburg, USTU, 2009. — 118 p.
4. Tashlykov O.L. O problem prodleniya resursa i zamene parogeneratorov AES s reactorami VVER-1000 [On the Problem of Life Prolongation and Replacement of Steam Generators of NPP with VVER-1000 Reactors] / O.L.Tashlykov, A.A. Kadnikov // Advanced Energy Technologies. Ecology, Economy, Safety and Education. Collected papers. Ekaterinburg, — 2006. — pp. 36 — 46.
5. Kadnikov A.A. Optimizatsiya rabot po zamene parogeneratorov AES s VVER-1000 [The Optimization of Replacing Steam generators of NPPs with VVER-1000]. / A.A. Kadnikov, O.L. Tashlykov, S.Ye. Sheklein // Abstracts of Papers of the Fifth International Scientific and Technical Conference "Safery, Efficiency and Economics of Nuclear Industry" (MNTK-2006) April 19 — 21, 2006. Moscow, 2006, pp. 141 — 143.
6. Tashlykov O.L. Dozovye zatraty personala v atomnoy energetike. Analiz. Puti snizheniya. Optimizatsiya. Monogr. [Dosimetric Costs of the Nuclear Energy Personnel. The Analysis, Reduction Ways and Optimization] / O.L. Tashlykov: monograph. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG. 2011. – 232 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Маслов О.В.

Поступила в редакцию 1 февраля 2012 г.