VVER REAKTORLARI AKTIV ZONASIDAGI MASSA ALMASHINUV JARAYONLARINING PASSIV TIZIMLAR ISHINING DAVOMIYLIGIGA TA'SIRINI BAHOLASH

Alovitdinov Xasan Alisher o'g'li
Moskva muhandislik-fizika instituti Milliy yadro tadqiqotlari universiteti (НИЯУМИФИ)
E-mail: alovitdinovkha@oiate.ru
Morozov Andrey Vladimirovich
Moskva muhandislik-fizika instituti Milliy yadro tadqiqotlari universiteti (НИЯУМИФИ)
Sharipbaev Sobitxon Sobir o'g'li
Namangan davlat texnika universiteti

Annotatsiya: Mazkur ilmiy ish issiqlik tashuvchi yo'qolishi bilan bog'liq avariya sharoitida VVER reaktorlarining aktiv zonasida bor kislotasining to'planishini tadqiq qilishga bag'ishlangan. Tadqiqotning asosiy predmeti sovutish kanallarining tiqilib qolishiga olib kelishi mumkin bo'lgan bor kislotasining kristallanish xavfi hisoblanadi. Ishning maqsadi passiv sovutish tizimlari bilan jihozlangan VVER-TOI reaktorining aktiv zonasida 72 soat davomida bor kislotasi to'planishining konservativ hisob-kitobini bajarishdir. Tadqiqotda passiv xavfsizlik tizimlarining (GE-1, GE-2, GE-3) ishlash prinsiplari tahlil qilingan. Muallifning ilmiy hissasi bor kislotasining maksimal konsentratsiyasini baholash uchun matematik model ishlab chiqish va uchinchi bosqich gidroyemkostlaridagi (GE-3) boshlang'ich konsentratsiyani kamaytirish orqali kristallanish xavfini oldini olish bo'yicha amaliy takliflar berishdan iborat.

Kalit so'zlar: atom elektr stansiyasi, avariyaviy himoya, kristallanish, bor kislotasi, to'planish, VVER, avariyaviy rejim, passiv tizimlar, gidroyemkost, konservativ hisob-kitob, AES xavfsizligi.

Аннотация. Данная научная работа посвящена исследованию накопления борной кислоты в активной зоне реакторов ВВЭР в условиях аварии с потерей теплоносителя. Основным предметом исследования является риск кристаллизации борной кислоты, который может привести к блокировке каналов охлаждения. Цель работы – выполнить консервативный расчет накопления борной кислоты в активной зоне реактора ВВЭР-ТОИ, оснащенного пассивными системами охлаждения, в течение 72 часов. В исследовании проанализированы принципы работы пассивных систем безопасности (ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3). Научный вклад автора заключается в разработке математической модели для оценки максимальной концентрации борной кислоты и предоставлении практических предложений по

ISSN 3030-3907

предотвращению риска кристаллизации путем снижения исходной концентрации в гидроемкостях третьей ступени (ГЭ-3).

Ключевые слова: атомная станция, аварийная защита, кристаллизация, борная кислота, накопление, ВВЭР, аварийный режим, пассивные системы, гидроемкость, консервативный расчет, безопасность АЭС.

Abstract. This scientific work is dedicated to the study of boric acid accumulation in the core of WWER reactors under loss-of-coolant accident conditions. The main subject of the research is the risk of boric acid crystallization, which can lead to the blockage of cooling channels. The aim of the work is to perform a conservative calculation of boric acid accumulation in the core of a WWER -TOI reactor, equipped with passive cooling systems, over a period of 72 hours. The study analyzes the operating principles of passive safety systems (HA-1, HA-2, HA-3). The author's scientific contribution consists of developing a mathematical model to assess the maximum boric acid concentration and providing practical proposals to prevent the risk of crystallization by reducing the initial concentration in the third-stage hydraulic accumulators (HA-3).

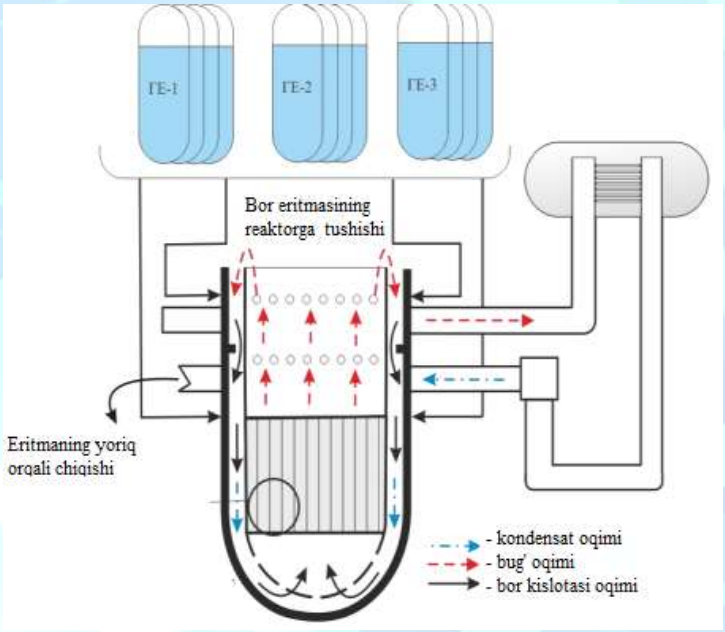
Keywords: nuclear power plant, emergency protection, crystallization, boric acid, accumulation, WWER, emergency mode, passive systems, hydraulic accumulator, conservative calculation, NPP safety.

Kirish

Suv bilan sovitiladigan energetik reaktorlar (VVER)dan foydalanishda xavfsizlikni ta'minlash atom energetikasining asosiy ustuvor yo‘nalishi hisoblanadi. VVER-TOI kabi zamonaviy AES loyihalari ko‘p bosqichli xavfsizlik tizimlari bilan jihozlangan bo‘lib, ularda ishlashi uchun tashqi energiya manbalarini talab qilmaydigan passiv tizimlar muhim rol o‘ynaydi.

Eng og‘ir loyihadan tashqari avariyalardan biri bu asosiy sirkulyatsiya quvurining katta diametrda yorilishi bilan bog‘liq avariya bo‘lib, u birinchi kontur issiqlik tashuvchisining tez yo‘qolishiga olib keladi (1-rasm). Bunday holda, aktiv zonaning haddan tashqari qizib ketishi va erishining oldini olish uchun zonani avariyaviy sovutish passiv tizimlari (ZASPT), xususan, gidroyemkostlar (GE) tizimi ishga tushiriladi. Bu tizimlar reaktorga bor kislotasi eritmasini yetkazib beradi, bu nafaqat aktiv zonani sovutadi, balki borning neytronlarni yutishi hisobiga reaktorning subkritik holatini ham ta'minlaydi.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Birinchi konturning germetik buzilishi tufayli bo‘lgan oqish bilan bog‘liq avariyalarda VVER reaktorlarda bor kislotasining harakatlanish sxemasi [10]

Uzoq muddatli (72 soatgacha) avtonom sovutishga mo‘ljallangan zamonaviy loyihalarda qoldiq issiqlik ajralishi hisobiga aktiv zonadan suvning uzluksiz bug‘lanishi sodir bo‘ladi. Shu bilan birga, gidroyemkostlardan kelayotgan bor kislotasi reaktorda qoladi, bu esa uning konsentratsiyasining asta-sekin o‘sishiga olib keladi. Eruvchanlik chegarasiga yetganda (avariya sharoitlari uchun ~415 g/kg) bor kislotasi kristallana boshlaydi va qattiq cho‘kindilarni hosil qiladi. Bu cho‘kindilar issiqlik ajratuvchi yig‘malarning o‘tish kesimlarini to‘sib qo‘yishi, issiqlik tashuvchining sirkulyatsiyasini buzishi va aktiv zonaning xavfsiz sovutilishiga tahdid solishi mumkin.

Shu munosabat bilan, ushbu ishning maqsadi VVER reaktorining aktiv zonasida 72 soatlik avariya davomida bor kislotasining to‘planish jarayonini konservativ baholash va uning kristallanish xavfini kamaytirish usullarini tahlil qilishdir. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar qo‘yildi:

- VVER-TOI reaktorining passiv ZASPT tizimlarining ishini tahlil qilish.
- Konservativ yaqinlashishda aktiv zonadagi bor kislotasi konsentratsiyasini hisoblash uchun matematik model ishlab chiqish.
- Eruvchanlik chegarasidan oshib ketish xavfini baholash.
- Uchinchi bosqich gidroyemkostlaridagi (GE-3) bor kislotasining dastlabki konsentratsiyasining aktiv zonadagi yakuniy konsentratsiyaga ta'sirini tahlil qilish.

ADABIYOTLAR TAHLILI

VVER reaktorlarining xavfsizligi va passiv tizimlarning ishlashi masalalari ilmiy adabiyotlarda keng yoritilgan. S.G. Kalyakin, O.V. Remizov, A.V. Morozov

ISSN 3030-3907

va boshqalarning ishlari passiv quyish tizimlarining, xususan, ikkinchi bosqich gidroyemkostlarining (GE-2) loyihaviy funksiyalarini asoslashga va ularning reaktorni avtonom sovutish vaqtini oshirishdagi rolini o‘rganishga bag‘ishlangan [1, 2]. V.M. Berkovich, A.B. Malishev, G.S. Taranov VVER-1000 reaktorli yangi avlod AES loyihalarining o‘ziga xos xususiyatlarini va passiv tizimlarning germoqobiqning lokalizatsiya funksiyalarini ta'minlashga ta'sirini ko‘rib chiqqanlar [3, 4].

Bor kislotasining to‘planishi va kristallanishi muammosi ham tadqiqotlar predmeti hisoblanadi. J. Tuunanen, J. Tuomisto, P. Raussi ishlarida issiqlik tashuvchi yo‘qolishi bilan bog‘liq avariyalar paytida uzoq muddatli sovutish davrida VVER-440 reaktoridagi bor kislotasi konsentratsiyasining eksperimental va analitik tadqiqotlari keltirilgan [5, 6]. Hisob-kitoblar uchun zarur bo‘lgan bor kislotasi eritmalarining fizik-kimyoviy xossalari N.D. Azizov, T.S. Axundovning ishlarida [7] va WCAP-17021-NP hisobotida [8] batafsil tavsiflangan.

Ushbu ishda konservativ yondashuv qo‘llaniladi, bunda reaktorga kirgan barcha bor kislotasi suyuq fazada qoladi, bug‘ bilan esa faqat toza suv olib ketiladi, deb faraz qilinadi. Bu yondashuv konsentratsiyaning yuqori, eng pessimistik bahosini olish imkonini beradi va xavfsizlikni tahlil qilish uchun asos bo‘lib xizmat qiladi. Haqiqatda bor kislotasini aktiv zonadan olib chiqishga yordam beradigan jarayonlar mavjud, masalan, bug‘da eruvchanlik [9] va tomchilab olib ketish [10]. Biroq, loyihadan tashqari avariya sharoitida bu jarayonlarni miqdoriy baholash sezilarli noaniqliklar bilan bog‘liq. Shuning uchun, ushbu tadqiqotda natijalarning konservativligini ta'minlash uchun bu effektlar ataylab hisobga olinmagan, ammo ularning keyingi tadqiqotlar uchun ahamiyati xulosada qayd etiladi.

METODOLOGIYA

VVER-TOI reaktorining aktiv zonasida bor kislotasining to‘planishini baholash uchun konservativ hisob kitoblarga asoslangan matematik modellashtirish metodologiyasidan foydalanildi.

Modelning asosiy taxminlari:

1. Birinchi konturning katta yorilishi bilan bog‘liq avariya senariysi ko‘rib chiqiladi, bu barcha passiv ZASPT tizimlarining ishga tushishiga olib keladi.
2. Aktiv zonadagi qoldiq issiqlik ajralishining barcha energiyasi suvni bug‘lantirishga sarflanadi.
3. Konservativ variant**:** Bor kislotasining aktiv zonadan bug‘ bilan birga olib ketilishi butunlay yo‘q. Bug‘ bilan faqat kimyoviy toza suv (H_2O) olib ketiladi. Bu shuni anglatadiki, gidroyemkostlardan reaktorga kirgan barcha bor kislotasi uning suv hajmidato‘planadi.

ISSN 3030-3907

4. Jarayon avariya boshlangan paytdan boshlab 72 soat (259 200 soniya) davomida modellashtiriladi.

5. GE-1, GE-2 va GE-3 tizimlarining ishlash parametrlari (hajmlar, sarflar, ishlash vaqti, dastlabki konsentratsiyalar) VVER-TOI loyiha ma'lumotlariga muvofiq qabul qilinadi.

Matematik model:

Aktiv zonadagi bor kislotasi massasining (M_{BK}) vaqt bo‘yicha o‘zgarishi massalar balansi differensial tenglamasi bilan tavsiflanadi:

$$\frac{dM_{BK}}{dt} = G_{kirish} * C_{kiris} \ , \qquad (1)$$

bu yerda:

- G_{kirish} – ayni paytda ishlayotgan gidroyemkostlardan kelayotgan bor kislotasi eritmasining umumiy massa sarfi (kg/s).
- C_{kirish} – kelayotgan eritmadagi bor kislotasi konsentratsiyasi (kg/kg).

Aktiv zonadagi suv massasi (M_{suv}) quyidagicha o‘zgaradi:

$$\frac{dM_{suv}}{dt} = G_{kirish} * (1 - C_{kirish}) - G_{bug'}, \qquad (2)$$

bu yerda $G_{bug'}$ – qoldiq issiqlik ajralishi hisobiga hosil bo‘ladigan bug‘ning massa sarfi (kg/s).

Aktiv zonadagi bor kislotasi konsentratsiyasi (C_{AZ}) istalgan t vaqtda quyidagicha hisoblanadi:

$$C_{AZ}(t) = \frac{M_{BK}(t)}{M_{suv}(t)}. \qquad (3)$$

Hisoblash kichik vaqt qadami bilan, passiv tizimlarning barcha ishlash bosqichlari uchun ketma-ket, sonli usulda amalga oshirildi. Olingan $C_{AZ}(t)$ konsentratsiya qiymatlari avariya parametrlari ($T \approx 120°C$, $P \approx 0{,}2$ MPa) sharoitida bor kislotasining eruvchanlik chegarasi (taxminan 415 g/kg) bilan taqqoslandi. Bu chegaradan oshib ketgan taqdirda, cho‘kmaga tushgan bor kislotasi massasi hisoblandi.

1-senariy: Asosiy konservativ hisob-kitob

Ushbu senariyda barcha gidroyemkostlardagi (GE-1, GE-2, GE-3) bor kislotasining dastlabki konsentratsiyasi loyihaviy qiymatga, ya'ni 16 g/kg ga teng deb qabul qilindi. Vaqt o‘tishi bilan konsentratsiyaning o‘zgarishini hisoblash natijalari grafikda keltirilgan va bunda loyihaviy xususiyatlar hisobga olingan.

Natijalardan ko‘rinib turibdiki, GE-1 va GE-2 tizimlarining dastlabki 24 soatlik ishlashi davomida bor kislotasi konsentratsiyasi ortadi, lekin eruvchanlik chegarasidan ancha past bo‘lib qoladi. Biroq, GE-3 tizimi ishga tushgandan so‘ng (avariya boshlanganidan 24 soat o‘tgach) va suvning bug‘lanish jarayoni davom etishi bilan konsentratsiyaning keskin o‘sishi boshlanadi. Taxminan avariyaning

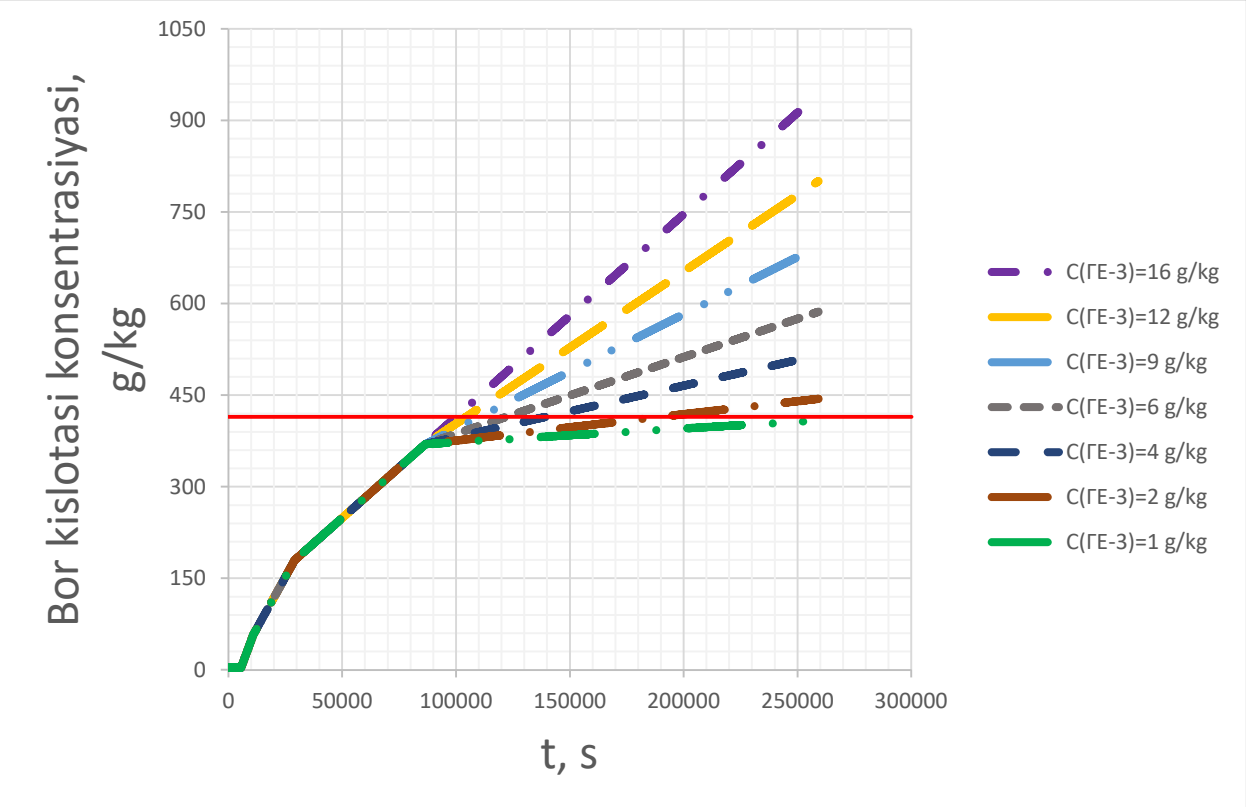
ISSN 3030-3907

28-soatida (≈100 000 s) aktiv zonadagi konsentratsiya eruvchanlik chegarasiga (415 g/kg) yetadi va kristallanish jarayoni boshlanadi. 72 soatlik davr oxiriga kelib, hisoblangan konsentratsiya 1089 g/kg qiymatiga yetadi, bu eruvchanlik chegarasidan 2.5 baravardan ko‘proqdir. Bu aktiv zonada katta miqdordagi (taxminan 20 tonna) qattiq cho‘kindilar hosil bo‘lishidan dalolat beradi, bu esa xavfsizlik nuqtai nazaridan yo‘l qo‘yib bo‘lmaydigan holatdir.

2-senariy: GE-3 tizimidagi konsentratsiyani pasaytirish

Avariyaning kechki bosqichida bor kislotasining to‘planishiga asosiy hissa GE-3 tizimi tomonidan qo‘shilganligi sababli, ushbu gidroyemkostlardagi bor eritmasining dastlabki konsentratsiyasini pasaytirishning ta'siri tahlil qilindi. GE-3 dagi turli konsentratsiya qiymatlari uchun hisob-kitoblar amalga oshirildi: 12, 9, 6, 4, 2 va 1 g/kg. Natijalar grafikda keltirilgan.

Jadvalga jamlangan hisob-kitob natijalari GE-3 dagi dastlabki konsentratsiya va aktiv zonadagi yakuniy konsentratsiya o‘rtasida to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liqlik mavjudligini ko‘rsatadi.



2-rasm. Hisoblash natijalari

Tahlil shuni ko‘rsatadiki, GE-3 dagi konsentratsiyani pasaytirish kristallanishga qarshi kurashishning yuqori samarali usuli hisoblanadi. Konsentratsiyani 2 g/kg gacha pasaytirilganda, cho‘kindilar massasi ahamiyatsiz bo‘lib qoladi. Uni 1 g/kg gacha yanada pasaytirish hatto eng konservativ yondashuv doirasida ham kristallanish xavfini deyarli butunlay yo‘q qiladi. Bu

ISSN 3030-3907

AES xavfsizligini oshirish maqsadida loyihaviy yechimlarni optimallashtirish uchun imkoniyat yaratadi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Ushbu ish doirasida VVER-TOI reaktorining aktiv zonasida uzoq muddatli loyihadan tashqari avariya sharoitida bor kislotasining to‘planishi konservativ baholangan. Amalga oshirilgan hisob-kitoblar shuni ko‘rsatadiki, bor kislotasini olib ketish mexanizmlarini hisobga olmasdan, faqat loyihaviy konsentratsiya (16 g/kg) asosida hisoblash, 28 soatdan keyin eruvchanlik chegarasiga yetish va 72 soat oxirida jiddiy kristallanish xavfini ko‘rsatadi. Shu bois, avariyaning kechki bosqichida ishga tushadigan GE-3 dagi bor konsentratsiyasini 1-2 g/kg gacha pasaytirish, butun 72 soat mobaynida chekadan oshib ketishning oldini olishga imkon beradi. Biroq, bu konservativ yondashuv to‘liq real jarayonni aks ettirmaydi va amalda bor kislotasini kamaytiruvchi mexanizmlar mavjud. Shuning uchun, VVER AESlarida yuqori konsentratsiyali qaynayotgan eritmadan bor kislotasining olib ketilishi jarayonlarini real avariya sharoitlariga yaqin parametrlarda tadqiq qilish zarur (xususan, bug‘dagi eruvchanlik va tomchilab olib ketish). Olingan eksperimental ma'lumotlar orqali mavjud modellar aniqlashtirilishi hamda konservativ taxminlardan voz kechilib, xavfsizlik tahlilini realistikroq qilish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Калякин С.Г., Ремизов О.В., Морозов А.В., Юрьев Ю.С., Климанова Ю.В. Обоснование проектных функций системы пассивного залива ГЕ-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 2. – С. 94-101.

2. Обоснование проектных функций системы пассивного залива ГЕ-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР / С.Г. Калякин, О.В.Ремизов, А.В. Морозов и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2003. – №2. – С. 4-101.

3. Ремизов О.В., Морозов А.В., Цыганок А.А. Экспериментальное исследование неравновесных теплогидравлических процессов в системе пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 115-123

4. Слободчук В.И., Лескин С.Т., Шелегов А.С., Кашин Д.Ю., Основные системы энергоблока с реактором ВВЭР-1000 / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021.

5. Tuunanen J., Tuomisto J., Raussi P. Experimental and analytical studies of boric acid concentrations in a VVER-440 reactor during the long-term cooling period of loss-of coolant accidents. — Nucl. Eng Design, 1992, v. 148, p. 217—231.

ISSN 3030-3907

6. Tuunanen J., Tuomisto J., Raussi P. Experimental and analytical studies of boric acid concentrations in a VVER-440 reactor during the long-term cooling period of loss-of coolant accidents. Nuclear Engineering and Design. 1992, v. 148, pp. 217-231.
7. Азизов Н.Д., Ахундов Т.С. Термические свойства водных растворов борной кислоты при 298—573 K / Теплофизика выс. темп., 1996, т. 34, вып. 5, с. 798— 802.
8. Summary of Tests to Determine the Physical Properties of Buffered and Un-Buffered Boric Acid Solutions. WCAP 17021-NP, Rev. 1. USA, 2010. 46 p
9. Styrikovich M.A., Tshvirashvili D.G., Nebieridze D.P. Investigations of the solubility of boric acid in saturated water vapor. Doklady AN SSSR. 1960, v. 134, no. 3, pp. 615-617 (in Russian).
10. А.В. Морозов, А.В. Питык, С.В. Рагулин, Оценка влияния капельного уноса борной кислоты на ее накопление в реакторе ВВЭР в случае аварии. – Безопасность, надежность и диагностика ЯЭУ, 2017.

ISSN 3030-3907