

# Основные подходы к управлению старением кабельной продукции на атомных электростанциях Украины

- **Белан Т. Р.**  
Государственное предприятие «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Киев, Украина  
ORCID 0000-0002-0280-6716
- **Резвик И. В.**  
Государственное предприятие «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Киев, Украина  
ORCID 0000-0002-6559-0537
- **Сахно А. В.**  
Государственное предприятие «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Киев, Украина  
ORCID 0000-0003-0131-3570
- **Бут А. П.**  
Государственное предприятие «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом», обособленное подразделение «Запорожская АЭС», г. Энергодар, Украина
- **Богданов С. Г.**  
Государственное предприятие «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом», обособленное подразделение «Запорожская АЭС», г. Энергодар, Украина

Рассмотрены основные и дополнительные механизмы старения кабельной продукции, применяемой на атомных электростанциях (далее – АЭС), возникающие в результате воздействий повреждающих факторов. Рассмотрены основные методы управления старением (далее – УС) кабелей — определение фактического срока службы и проведения испытаний с помощью натуральных методов и других средств. Приведены основные принципы организации управления старением кабелей на АЭС Украины, а также применяемые методы обследования технического состояния кабелей. О Приведены результаты отдельных лабораторных исследований для отобранных представительных силовых кабелей на напряжение 1 кВ с изоляцией из поливинилхлоридных (далее – ПВХ) пластикумов энергоблока № 1 Обособленного подразделения Государственного предприятия «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» (далее – ОП) «Южно-Украинская АЭС» (далее — ОП ЮУ АЭС), энергоблока № 1 ОП «Запорожская АЭС» (далее — ОП ЗАЭС) и энергоблока № 2 ОП «Хмельницкая АЭС» (далее — ОП ХАЭС), проведенных в рамках продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС Украины, которые включали в себя этап лабораторного обследования и обследования образцов кабелей в условиях эксплуатации. Получены: зависимости срока эксплуатации отдельных кабелей типа от температуры эксплуатации. Представлены возможности и условия, при которых допустима эксплуатация кабелей в дополнительный срок службы.

К л ю ч е в ы е с л о в а : атомная станция, кабель, продление срока эксплуатации, старение

© Белан Т. Р., Резвик И. В., Сахно А. В., Бут А. П., Богданов С. Г., 2019

Целью выполнения работ по управлению старением (УС) кабелей является обеспечение безопасной эксплуатации кабелей и выполнение ими своих функций на протяжении срока службы АЭС, а также при использовании кабелей сверх установленного срока службы.

Требования к управлению старением кабельной продукции устанавливаются в ряде нормативно-правовых актов [1] — [4], программных и методических документах эксплуатирующей организации [15] — [20], а также отражены в стандартах эксплуатирующей организации по квалификации оборудования, входящего в системы, важные для безопасности, на «жесткие условия» окружающей среды энергоблока ОП АЭС [21] — [22]. При разработке нормативных и регулирующих документов по УС кабелей учитываются также рекомендации документов международных организаций [23] — [27].

### Механизмы старения кабелей

Механизмы старения кабелей определяются в основном материалом изоляции и воздействующими на него повреждающими факторами, к числу которых относятся [5]:

повышенная температура или влажность окружающей среды;

циклическое механическое воздействие;

радиоактивное облучение;

воздействие распыленной борной кислоты.

В результате этих воздействий могут происходить следующие механизмы старения [2, 15]:

тепловая деградация изоляции кабеля из-за воздействия температуры окружающей среды и температуры жил, нагретых электрическим током;

потеря поверхностных изолирующих свойств под воздействием электрического поля и влажности;

удлинение при растяжении (при сползании кабеля), остаточная деформация при сжатии, случайное физическое повреждение в процессе эксплуатации;

для кабелей гермозоны — потеря изоляционных свойств материала из-за разрыва молекулярных цепей с образованием свободных радикалов под воздействием ионизирующего излучения, повышенных температур и влажности.

К дополнительным механизмам старения относятся [16]:

для силовых кабелей с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) — старение пропитывающего состава и бумажных лент, образование воздушных пор из-за стекания вязкой пропитки, образование воскообразных отложений под действием частичных разрядов в масляных прослойках и воздушных включениях между слоями бумаги;

для кабелей с полиэтиленовой изоляцией (ПЭ) — образование древовидных каналов неполного пробоя — дендритов: электрических, образующихся под действием сильного электрического поля, и водных, образующихся в результате проникновения воды в толщу изоляции (вода проникает в радиальном направлении — сквозь полимерные оболочки, а в осевом направлении — вдоль многопроволочных жил);

для кабелей с поливинилхлоридной изоляцией (ПВХ) — снижение эластичности изоляции из-за миграции и улетучивания пластификаторов, деструкции поливинилхлоридной смолы с выделением хлористого водорода (протекает особенно интенсивно после насыщения хлористым водородом стабилизаторов на основе окислов свинца, входящих в состав ПВХ изоляции).

Доминирующими механизмами старения для кабельных разъемов являются механический износ и окисление контактов.

Основными методами [5], [16] управления старением кабелей являются:

1) определение фактического срока службы путем прокладки образцов кабелей в кабельное хранилище около реактора или парогенератора, где они старятся естественным образом по мере функционирования АЭС, с возможностью их дальнейшего удаления и проведения испытаний описанными ниже методами;

2) испытание существующих кабелей с помощью натуральных методов и других средств.

Среди методов испытания кабелей для управления старением выделяют [5]:

визуальный осмотр изоляции и измерение размера трещин, изменение цвета и т. д.;

испытание твердости изоляции;

химический анализ изоляции;

испытания электрической изоляции;

измерение прочности на растяжение;

измерение удлинения при разрыве;  
измерения потерь в диэлектрике при низкой частоте или частоте развертки;  
испытание по методу динамической рефлектометрии;  
измерения полного сопротивления по переменному и постоянному току.

Электрические испытания подразумевают измерения полного сопротивления и испытания методом динамической рефлектометрии. Для определения состояния материала изоляции или оболочки кабеля дополнительно измеряют электрические параметры, такие как сопротивление изоляции (по возможности), сопротивление по постоянному току, полное сопротивление по переменному току и последовательную емкость. При механическом испытании кабелей измеряют пластичность материала изоляции или оболочки кабеля, чтобы определить, не стал ли материал сухим, ломким или склонным к растрескиванию. Соответствующее испытательное оборудование называется кабельный индентор. В основном это устройство используется для сжатия кабеля и измерения его относительной твердости. При химическом испытании кабелей отслаивают немного материала изоляции кабеля для химического анализа в лаборатории.

Для большинства указанных измерений требуются исходные данные для сравнения и интерпретации. Вместо исходных данных допускается использовать характеристики кабелей, применяемых в подобных установках.

Перечисленные выше виды испытаний используют комбинированно с учетом типа изоляции кабеля, т. к. ни один из существующих видов испытаний в отдельности не обеспечивает необходимую полноту оценки технического состояния кабелей.

Механизмы старения полимерных изоляционных материалов, а также методы, применяемые для неразрушающего контроля рассмотрены авторами [7] — [14].

Методы определения характеристик материала (уже существующих и новых) для мониторинга изменения свойств полимерного материала, а также для установления связи между свойствами материала и условиями старения, которые могут помочь в прогнозировании состояния кабелей и оценке их оставшегося срока службы описаны в [6].

### Организация процесса УС кабелей на АЭС Украины

Для УС кабелей на АЭС Украины разработана типовая «Программа управления старением кабелей АЭС. ПМ-Т.0.08.121-14» [15], которая распространяется на контрольные и силовые кабели, эксплуатируемые на энергоблоках АЭС. Требования [15] являются обязательными при проведении работ по оценке технического состояния и управлению старением кабелей, принадлежащих к системам, важным для безопасности (далее — СВБ) (2 и 3 класса безопасности согласно [1]), и могут быть использованы при проведении работ по оценке технического состояния кабелей и управлению старением кабелей систем нормальной эксплуатации (4 класса согласно [1]).

Организация процесса УС кабелей включает в себя [15] в частности мониторинг условий эксплуатации кабелей, целью которого является определение фактических условий эксплуатации. Объем работ по мониторингу определяется с учетом внешних воздействующих факторов, которые вносят основной вклад в процесс старения кабелей — температура окружающей среды и ионизирующее излучение (для кабелей внутри гермозоны). Постоянный мониторинг проводится только в «горячих точках» — локальных областях внутри АЭС, характеризующихся наибольшей интенсивностью воздействия внешних факторов — вплоть до снятия энергоблока АЭС из эксплуатации.

При выполнении работ по УС кабелей разрабатываются следующие обязательные перечни [15]:

- общий перечень кабелей, подлежащих УС (кабели СВБ);

- перечень представительных кабелей для оценки их технического состояния (в который включаются кабели, срок эксплуатации которых истекает до окончания проектного срока эксплуатации энергоблока и находящиеся в «горячих точках»);

- перечень «горячих точек»;

- перечень образцов-свидетелей кабелей.

Общий перечень и перечень представительных кабелей разрабатываются на АЭС для каждого энергоблока.

На АЭС организован подход, согласно которому подразделение-владелец кабеля приступает к выполнению работ по оценке технического

состояния за три года до окончания срока эксплуатации кабеля.

Методы обследования технического состояния кабелей разделяются [15] на:

методы обследования в условиях эксплуатации (обеспечивают неразрушающий контроль технического состояния);

методы обследования в лабораторных условиях.

Методы обследования кабелей в лабораторных условиях обеспечивают испытания и контроль материалов изоляции кабелей, отобранных с энергоблоков АЭС, включая ускоренное тепловое и радиационное старение. Важной частью оценки технического состояния кабелей СВБ является оценка способности выполнять возложенные на них функции безопасности не только при нормальной эксплуатации, но и при проектных авариях с учетом характеристик среды, в которой они функционируют [1]. Это реализуется путем обеспечения взаимосвязи мероприятий по управлению старением с мероприятиями по квалификации оборудования [16]. С этой целью в объем работ по обследованию кабелей в лабораторных условиях включают испытания в моделируемых аварийных и пост-аварийных условиях, процедура проведения которых регламентируется стандартами [21], [22].

По результатам оценки технического состояния кабелей принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации кабеля или о необходимости замены кабелей, дальнейшая безопасная эксплуатация которых невозможна.

Методология определения срока продления эксплуатации [19] основана на проведении испытаний образцов представительных кабелей с использованием методов ускоренного старения в лабораторных условиях.

Расчетный срок продления зависит от условий эксплуатации конкретного типа кабелей (максимальной рабочей температуры, расположения в «чистой зоне» или внутри герметичной части реакторного отделения) и может быть различным для кабелей одного типа, находящихся в разных условиях эксплуатации.

Возможность и длительность срока продления эксплуатации определяется путём подтверждения соответствия технических характеристик образца кабеля требованиям нормативной документации до и после ускоренного теплового и радиационного старения образца [19].

Критерий продления срока эксплуатации кабелей, находящихся в эксплуатации, заключается в выполнении следующих условий [19]:

по результатам испытаний образцов кабелей на ускоренное старение определены возможность и длительность срока продления эксплуатации;

результаты обследования представительных кабелей в условиях эксплуатации на энергоблоке положительны;

показатели эксплуатационной надёжности кабелей соответствуют требованиям, установленным в НД.

В рамках продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС Украины была проведена оценка состояния кабелей, определение возможности и условий, при которых допустима их эксплуатация в дополнительный срок службы. Полученные результаты отдельных лабораторных исследований для отобранных представительных кабелей энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС, энергоблока № 1 ОП ЗАЭС и энергоблока № 2 ОП ХАЭС представлены ниже.

Объектом обследования в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации были силовые кабели на напряжение 1 кВ с изоляцией из ПВХ пластикатов: (типа АВВГнг 4х95 энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС [29], АВВГ 3х50+1х25 энергоблока № 1 ОП ЗАЭС [30], [31], ВВГнг 4х6 энергоблока № 2 ОП ХАЭС [32]).

Объём выполняемых работ и методы обследования технического состояния кабелей в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации были установлены в соответствии с требованиями Рабочих программ, в частности [28].

Этап лабораторного обследования включал в себя обследование образцов кабелей в исходном состоянии, ускоренное тепловое и радиационное старение образцов, обследование образцов после ускоренного старения, а также анализ результатов обследований технического состояния кабелей и определение возможных сроков продления эксплуатации.

В процессе обследования образцов кабелей выполнялись измерения следующих параметров: электрического сопротивления изоляции жил относительно других жил и экранов (R) [29], [33]; емкости (C) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\tan\delta$ ) изоляционных промежутков между жилами, жилами и экранами кабелей при частотах 100 Гц, 1 и 10 кГц [29], [33];

восстанавливающегося напряжения ( $U_v$ ) [29];  
относительного удлинения материалов изоляции образцов кабелей по диаграммам кривых растяжения [29];

измерение предела прочности при разрыве  $\sigma_r$  и относительного удлинения  $\Delta l/l$  [30];

устойчивости образца кабеля при механических воздействиях [30];

проверка радиальной герметичности образца кабеля в течение 5 мин в ванне с водой при напряжении 1500 В [30];

измерение потери массы ПВХ материалов в процессе термического воздействия [30].

Анализ результатов измерения сопротивления изоляции жил образцов кабелей, пересчитанных к нормированной температуре и длине, показывает, что значения сопротивления изоляции жил образцов кабелей после ускоренного старения соответствует нормам, установленным для кабелей, находящимся в условиях эксплуатации, а по отдельным образцам — нормам, установленным ТУ на новые кабели.

В то же время, после длительного теплового старения кабеля ВВГнг 4х6 энергоблока № 2 ОП ХАЭС произошла потеря цвета [32] повышение жесткости изоляции жил и оболочки, появились трещины, изменился характер зависимостей от частоты  $\tan\delta$ : от растущего, характерного для пластифицированного ПВХ пластиката до падающего, характерного для материала с трещинами [32].

Защитная ПВХ оболочка кабеля АВВГ 3х50+1х25 энергоблока № 1 ОП ЗАЭС в исходном состоянии и после ускоренного теплового старения выдержала испытания на радиальную герметичность в ванне с водой [30]. Наименьшее значение относительного удлинения ( $\Delta l/l$ ) изоляционного материала после ускоренного теплового старения составило: 300 % для жил и 275 % для защитной оболочки. Это удовлетворительный результат, т. к. превышает предельное значение 50 % [30]. Измерения массы ПВХ материалов (образцы из ПВХ изоляции жил и оболочки) образца кабеля проводились в исходном состоянии и после термического воздействия, которое проводилось в течение 40 часов при температуре 120 °С [30]. Потеря массы ПВХ материалов находится в пределах от 1,62 до 2,53 %. Критическое значение убыли массы ПВХ материалов, при котором теряются эластичные свойства изоляции и могут возникнуть трещины, составляет 25 %. Таким образом,

потеря массы ПВХ материалов образца кабеля не превышает предельного значения [30].

Выполненный лабораторный анализ позволил сделать следующие выводы:

1) силовые кабели АВВГнг, ВВГнг, АВВГ успешно прошли лабораторные испытания;

2) техническое состояние образцов силовых кабелей АВВГнг, ВВГнг, АВВГ до и после ускоренного старения соответствует требованиям, приведенным в НД на кабели для условий эксплуатации.

Рекомендуемые сроки эксплуатации, полученные по результатам лабораторного обследования технического состояния образцов кабелей [29] — [32], приведены в таблице 1.

По окончании рекомендуемых сроков продления эксплуатации кабелей необходимо провести их обследование с целью установления их фактического технического состояния и принятия решения о дальнейшей эксплуатации.

На этапе обследования образцов кабелей в условиях эксплуатации выполнялись измерения основных (базовых) и дополнительных (диагностических) параметров изоляции кабелей [29]:

сопротивления изоляции жил на 15-й, 30-й и 60-й секундах с момента приложения напряжения);

тока утечки при максимальном испытательном напряжении;

статической емкости (при зарядке объекта постоянным испытательным напряжением);

постоянных времен саморазряда (параметров, не зависящих от толщины изоляции и длины кабеля);

параметров диэлектрической абсорбции;

восстанавливающегося напряжения — после длительной зарядки объекта испытательным напряжением 500 В и разрядки в течение 2 с;

емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков между жилами, жилами и экранами кабелей при переменном напряжении частот 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц;

модулей упругости ПВХ оболочек кабелей.

Техническое состояние представительных кабелей, обследованных в условиях эксплуатации, и положительные результаты лабораторных обследований образцов кабелей после ускоренного старения позволили распространить результаты обследований, выводы и рекомендации на все кабели типа АВВГ, АВВГнг, ВВГ, ВВГнг энергоблоков № 1 ОП ЗАЭС, № 2 ОП ХАЭС, № 1 ОП ЮАЭС [29] — [32].

Таблица 1 — Рекомендуемые сроки эксплуатации силовых кабелей АВВГнг, ВВГнг, АВВ

Тип кабеля	Рекомендуемый срок эксплуатации, лет	Рекомендации по условиям эксплуатации
ВВГнг	17	При температуре эксплуатации до 40 °С
	Рисунок 1	При температуре эксплуатации свыше 40 °С
АВВГ	10	При температуре эксплуатации до 37 °С
	Рисунок 2	При температуре эксплуатации свыше 37 °С
АВВГнг	20	При температуре окружающей среды до 32 °С
	Рисунок 3	При температуре окружающей среды свыше 32 °С

Рисунок 1 — Зависимость срока эксплуатации кабелей типа ВВГнг 4х6 от температуры эксплуатации [32]

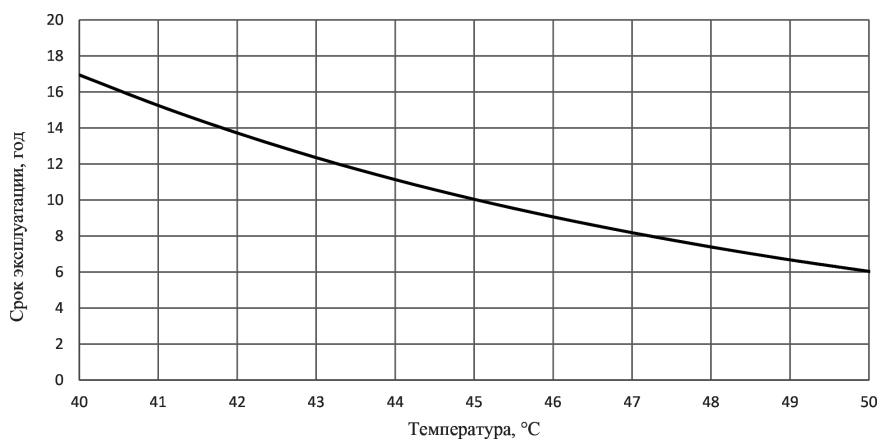


Рисунок 2 – Зависимость срока эксплуатации кабелей типа АВВГ от температуры эксплуатации [30]

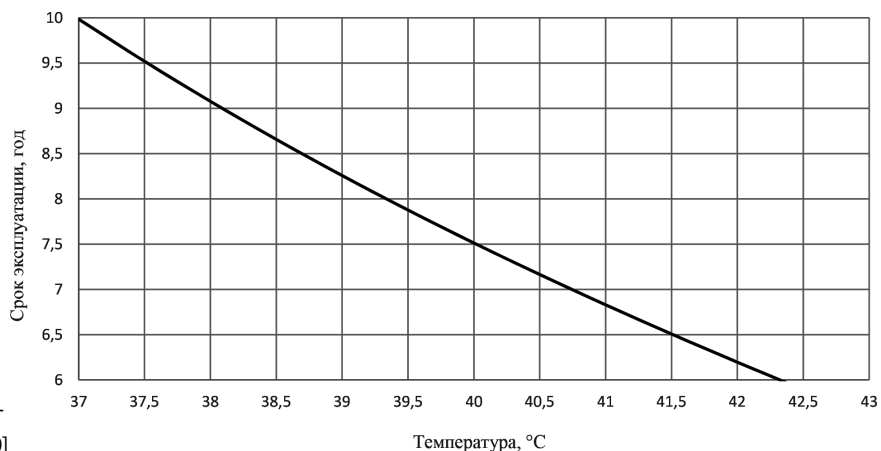
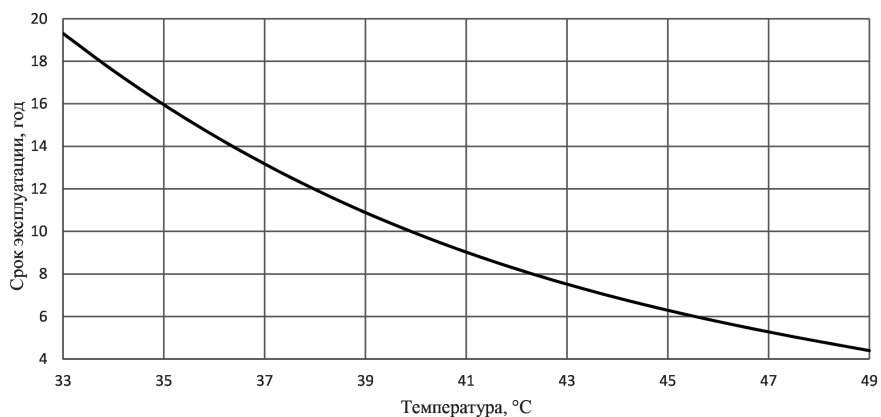


Рисунок 3 — Зависимость срока эксплуатации кабелей типа АВВГнг (а) от температуры эксплуатации [29].



## Выводы

В работе определены основные повреждающие факторы на АЭС и соответствующие им механизмы старения кабельной продукции. Проанализированы электрические характеристики и механические свойства, изменение которых позволяет оценить степень старения кабелей. Выделены основные этапы организации процесса УС и продления срока эксплуатации кабелей. Определен список обязательных перечней при выполнении работ по УС кабелей. Приведены критерии принятия решения о продлении срока эксплуатации кабелей, находящихся в эксплуатации.

В работе кратко изложены отдельные результаты работ по оценке состояния кабельных линий, которые проводились в рамках продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС Украины. Полученные результаты лабораторных исследований позволили определить возможности и условия, при которых допустима эксплуатация сверх установленного срока службы силовых кабелей АВВГнг, ВВГнг, АВВнг, а также рекомендуемые сроки продления их эксплуатации.

## Перечень использованной литературы

1. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. 57 с
2. НП 306.2.210-2017 Загальні вимоги до управління старінням елементів і конструкцій та довгострокової експлуатації енергоблоків атомних станцій. К.: Державна інспекція ядерного регулювання України, 2017. 10 с.
3. НП 306.2.099-2004. Загальні вимоги до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2004. 21 с.
4. НП 306.2.214-2017. Вимоги до періодичної переоцінки безпеки енергоблоків атомних станцій. К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2017. 24 с.
5. IEC 62342:2007. Nuclear power plants — Instrumentation and control systems important to safety — Management of ageing, 88 p.
6. Rouison D., Riahinezhad M., Anandakumaran A. (2019) How Can Material Characterization Support Cable Aging Management?. In: Jackson J., Paraventi D., Wright M. (eds) Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems — Water Reactors. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.
7. Bowler, Nicola and Liu, Shuaishuai, «Aging Mechanisms and Monitoring of Cable Polymers» (2015). Materials Science and Engineering Publications. 258.

8. Hashemian, H. M., McConkey, B., Harmon, G., & Sexton, C. (2013). Methods for testing nuclear power plant cables. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 16(5), 31–36.
9. SAND2005-7331, K. T. Gillen, R. A. Assink, R. Bernstein, Nuclear Energy Plant. Optimization (NEPO) Final Report on Aging and Condition Monitoring of Low-Voltage Cable Materials (2005).
10. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.6. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Nuclear Power Technical Report. Vienna, 2012, 96 p.
11. EPRI Report 3002010641. Low-Voltage and Instrumentation and Control Cable Aging Management Guide, Revision 1. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 2017, 72 p.
12. Verardi, L. (2014). Aging of nuclear power plant cables: in search of non-destructive diagnostic quantities (Doctoral dissertation, alma), 122 p.
13. McCarter, D., Shumaker, B., McConkey, B., & Hashemian, H. (2014). Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Cable Prognostics Using Indenter Modulus Measurements. International Journal of Prognostics and Health Management, 16(5), 1–10.
14. Coble, J., Ramuhalli, P., Bond, L. J., Hines, J., & Ipadhyaya, B. (2015). A review of prognostics and health management applications in nuclear power plants. International Journal of Prognostics and Health Management, 6.
15. ПМ-Т.0.08.121–14. Програма управління старінням кабелей АЭС, К.: ГП НАЭК «Енергоатом», 63 с.
16. ПМ-Д.0.03.476–18. Програма работ по квалификации оборудования АЭС ГП НАЭК «Енергоатом», К.: ГП НАЭК «Енергоатом», 23 с.
17. МТ-Т.0.03.172–12. Методика обследования технического состояния силовых кабелей АЭС методами неразрушающего контроля, К.: ГП НАЭК «Енергоатом».
18. МТ-Т.0.03.160–16. Методика обследования технического состояния контрольных кабелей АЭС методами неразрушающего контроля, К.: ГП НАЭК «Енергоатом».
19. МТ-Т.0.03.339–14. Методика определения срока продления эксплуатации кабелей на энергоблоках АЭС, К.: ГП НАЭК «Енергоатом».
20. МТ-Д.0.03.530–11. Методика адаптации результатов лабораторных испытаний кабелей на другие энергоблоки АЭС с целью управления старением, К.: ГП НАЭК «Енергоатом».
21. СОУ НАЕК 179:2019. Инженерная, научная и техническая поддержка. Квалификация оборудования энергоблоков АЭС ГП «НАЭК «Енергоатом». Общие требования, К.: ДП НАЕК «Енергоатом», 2019. 30 с.
22. СОУ НАЕК 181:2019. Инженерная, научная и техническая поддержка. Квалификация оборудования, важного для безопасности, на условия окружающей среды. Общие требования, К.: ДП НАЕК «Енергоатом», 2019. 30 с.
23. IAEA Safety Standards Series No. SSG-39. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. Vienna, 2016, 161 p.
24. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements. Vienna, 2016, 71 p.
25. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1). Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation. Specific Safety Requirements. Vienna, 2017, 58 p.
26. IAEA Safety Standards Series No. SSG-25. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. Vienna, 2013, 126 p.
27. IAEA Safety Standards Series No. SSG-48. Ageing management and development of a programme for long

term operation of nuclear power plants. Specific Safety Guide. Vienna, 2018, 65 p.

28. 123456001020.ЭЦ.00.ПМ.309 Рабочая программа проведения обследования технического состояния оборудования ОП ЗАЭС. Продление срока эксплуатации. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией (АВВГ, АВВГнг), ОП ЗАЭС ГП НАЭК «Энергоатом», 29 с.

29. EP03-2009.744.ОД.01 Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по периодической переоценке безопасности. Фактор № 4. «Старение сооружений, систем и элементов», 475 с.

30. Технический отчет о выполнении работ по теме «Обследование и оценка технического состояния кабелей типа АВВГ энергоблока № 1 ОП ЗАЭС в лабораторных условиях» 145-КОРО-15 от 22.03.2016, 14 с.

31. Отчет «Обследование технического состояния кабеля АВВГ энергоблока № 1 ОП ЗАЭС в условиях эксплуатации», ОП ЗАЭС ГП НАЭК «Энергоатом», 15.02.2016, 9 с.

32. 43-251.203.006.ОБ.01.04 Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 2. Отчет по периодической переоценке безопасности. Фактор безопасности № 4. Том 1.4. Глава 1. Техническое состояние систем и элементов анализируемого энергоблока. Часть 4. Старение сооружений, систем и элементов важных для безопасности, 230 с.

33. № 638 — ЦЦ-07. Технический отчет о выполнении работ по теме «Обследование технического состояния кабелей энергоблока № 2 ОП ХАЭС», 57 с.

## References

- NP 306.2.141-2008 (2008), «General Safety Provisions for Nuclear Power Plants» [Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii], Kyiv, SNRIU, 57 p. (Ukr).
- NP 306.2.210-2017 (2017). «General requirements for aging management elements and structures and long-term operation of nuclear power stations» [Zahalni vymohy do upravlinnja starinnjam elementiv i konstrukcij ta dovg-hostrokovoji ekspluataciji energhoblokov atomnykh stantsij], Kyiv, SNRIU, 10 p. (Ukr).
- NP 306.2.099-2004 (2004), «General Requirements for Long-Term Operation of NPP Units upon Results of Periodic Safety Review» [Zahalni vymohy do prodovzhennia ekspluatatsii energhoblokov AES u ponadproektnyj strok za rezultatamy zdiisnennia periodychnoi pereotsinky bezpeky], Kyiv, SNRIU, 21 p. (Ukr).
- NP 306.2.214-2017 (2017), «Requirements for periodic safety reassessment of nuclear power stations» [Vymohy do periodychnoji pereotsinky bezpeky energhoblokov atomnykh stantsij], Kyiv, SNRIU, 24 p. (Ukr).
- IEC 62342:2007. Nuclear power plants — Instrumentation and control systems important to safety — Management of ageing, 88 p (Eng).
- Rouison D., Riahinezhad M., Anandakumaran A. (2019) How Can Material Characterization Support Cable Aging Management?. In: Jackson J., Paraventi D., Wright M. (eds) Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems — Water Reactors. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham (Eng).
- Bowler, Nicola and Liu, Shuaishuai, «Aging Mechanisms and Monitoring of Cable Polymers» (2015). Materials Science and Engineering Publications. 258 (Eng).
- Hashemian, H. M., Mcconkey, B., Harmon, G., & Sexton, C. (2013). Methods for testing nuclear power plant cables. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 16(5), 31–36 (Eng).
- SAND2005-7331, K. T. Gillen, R. A. Assink, R. Bernstein, Nuclear Energy Plant. Optimization (NEPO) Final Report on Aging and Condition Monitoring of Low-Voltage Cable Materials (2005) (Eng).
- IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.6. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Nuclear Power Technical Report. Vienna, 2012, 96 p. (Eng).
- EPRI Report 3002010641. Low-Voltage and Instrumentation and Control Cable Aging Management Guide, Revision 1. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 2017, 72 p.
- Verardi, L. (2014). Aging of nuclear power plant cables: in search of non-destructive diagnostic quantities (Doctoral dissertation, alma), 122 p.
- McCarter, D., Shumaker, B., McConkey, B., & Hashemian, H. (2014). Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Cable Prognostics Using Indenter Modulus Measurements. International Journal of Prognostics and Health Management, 16(5), 1–10 (Eng).
- Coble, J., Ramuhalli, P., Bond, L. J., Hines, J., & Ipadhyaya, B. (2015). A review of prognostics and health management applications in nuclear power plants. International Journal of prognostics and health management, 6 (Eng).
- PM-T.0.08.121-14 (2014), «NPP Cable Aging Management Program» [Prohramma upravlynja starenjem kabelej AES], Kyiv, NNEGC «Energoatom», 63 p. (Ukr).
- PM-D.0.03.476-18. «The program of works for NPP's equipment qualification of NNEGC «Energoatom» [Prohramma rabot po kvalyfykacyi oborudovanyja AES GhP NAEK «Energhoatom»], Kyiv, NNEGC «Energoatom», 23 p. (Ukr).
- MT-T.0.03.172-12. Metodika obsledovanyja tekhnicheskogho sostojanyja sylovykh kabelej AES metodami nerazrushajushhegho kontrolja [Technique for examining the technical condition of nuclear power cables using non-destructive testing methods], Kyiv, NNEGC «Energoatom».
- MT-T.0.03.160-16. Metodika obsledovanyja tekhnicheskogho sostojanyja kontroljnykh kabelej AES metodami nerazrushajushhegho kontrolja. [Methodology for examining the technical condition of control cables of nuclear power plants using non-destructive testing methods], Kyiv, NNEGC «Energoatom».
- MT-T.0.03.339-14. Metodika opredelenija sroka prodlenija ekspluatatsii kabelej na energhobloках AES [Methodology for determining the term for the extension of cable operation at nuclear power units], Kyiv, NNEGC «Energoatom».
- MT-D.0.03.530-11. Metodika adaptatsii rezul'tatov laboratornykh ispytanij kabelej na drughie energhobloki AES s cel'ju upravlenja starenjem [Methodology for adapting the results of laboratory tests of cables to other nuclear power units to control aging], Kyiv, NNEGC «Energoatom».
- SOU NAEK 179:2019 Inzhenernaja, nauchnaja i tekhnicheskaja podderzhka. Kvalifikacija oborudovanyja energhoblokov AES GhP «NAEK «Energhoatom». Obshhie trebovanija. [Engineering, scientific and technical support. Qualification of equipment of power units at NPPs NNEGC Energoatom. General requirements], Kyiv, NNEGC «Energoatom», 30 p. (Rus).
- SOU NAEK 181:2019 Inzhenernaja, nauchnaja i tekhnicheskaja podderzhka. Kvalifikacija oborudovanyja, vaznogho dlja bezopasnosti, na uslovija okružhajushhej sredy.



Obshchie trebovaniya. [Engineering, scientific and technical support. Qualification of equipment important to safety for environmental conditions. General requirements], Kyiv, NNEGC «Energoatom», 30 p (Rus).

23. IAEA Safety Standards Series No. SSG-39. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. Vienna, 2016, 161 p (Eng).

24. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements. Vienna, 2016, 71 p (Eng).

25. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1). Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation. Specific Safety Requirements. Vienna, 2017, 58 p (Eng).

26. IAEA Safety Standards Series No. SSG-25. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. Vienna, 2013, 126 p (Eng).

27. IAEA Safety Standards Series No. SSG-48. Ageing management and development of a programme for long term operation of nuclear power plants. Specific Safety Guide/ Vienna, 2018, 65 p. (Eng).

28. 123456001020.ETS.00.PM.309 Rabochaya programma provedeniya obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya OP ZAES. Prodleniye sroka ekspluatatsii. Kabeli silovyye s plastmassovoy izolyatsiyey (AVVG, AVVGng) [Work program for the inspection of the technical condition of the equipment of OP ZAES. Extension of service life. Power cables with plastic insulation (AVVG, AVVGng)], SS «Zaporizhzhya NPP», NNEGC «Energoatom», 29 p (Rus).

29. YER03-2009.744.OD.01 Yuzhno-Ukrainskaya AES. Energoblok № 1. Otchet po periodicheskoy pereotsenke bezopasnosti. Faktor № 4. «Stareniye sooruzheniy, sistem i elementov» [South-Ukrainian NPP. Power unit No. 1. Report on periodic safety reassessment. Factor No. 4. «Aging of structures, systems and elements»], 475 p (Rus).

30. 145-KORO-15 Tekhnicheskii otchet o vypolnenii rabot po teme «Obsledovaniye i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya kabeley tipa AVVG energobloka № 1 OP ZAES v laboratornykh usloviyakh» [Technical report on the implementation of work on the topic «Inspection and assessment of the technical condition of cables of type AVVG of power unit No. 1 of OP ZAES in laboratory conditions»], 14 p (Rus).

31. Otchet «Obsledovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya kabeley AVVG energobloka № 1 OP ZAES v usloviyakh ekspluatatsii» ot 15.02.2016 [The report «Inspection of the technical condition of the cable AVVG power unit No. 1 OP ZAES in operating conditions» dated 02.15.2016], SS «Zaporizhzhya NPP», NNEGC «Energoatom», 2 p (Rus).

32. Khmel'nitskaya AES. Energoblok № 2. Otchet po periodicheskoy pereotsenke bezopasnosti. Faktor bezopasnosti № 4. Tom 1.4. Glava 1. Tekhnicheskoye sostoyaniye sistem i elementov analiziruyemogo energobloka. Chast' 4. Stareniye sooruzheniy, sistem i elementov vazhnykh dlya bezopasnosti [Khmelnitsky nuclear power plant. Power unit No. 2. Report on periodic safety reassessment. Safety Factor No. 4. Volume 1.4. Chapter 1. Technical condition of systems and elements of the analyzed power unit. Part 4. Aging of structures, systems and components important to safety], 230 p (Rus).

33. № 638 — STS-07. Tekhnicheskii otchet o vypolnenii rabot po teme «Obsledovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya kabeley energobloka № 2 OP KHAES» [No. 638 — SC-07. Technical report on the implementation of work on the topic «Inspection of the technical condition of the cables of power unit No. 2 of OP KhNPP»], 57 p (Rus).

## Main Approaches to Cable Aging Management at Nuclear Power Plants in Ukraine

**Bilan T.<sup>1</sup>, Rezvik I.<sup>1</sup>, Sakhno O.<sup>1</sup>, But O.<sup>2</sup>, Bogdanov S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom», Zaporizhzhya Nuclear Power Plant, Enerhodar, Ukraine

The mechanisms of cable ageing at nuclear power plants (NPPs) mainly depending on the insulation material, as well as the damaging factors affecting cables that are determined by the operating conditions are considered in the paper. The main and additional mechanisms of aging resulting from the effects of damaging factors are provided. The paper presents the main methods of cable aging management: determining the actual service life and testing using field methods and other means. The basic principles for the arrangement of cable aging management at Ukrainian NPPs, as well as the methods used to investigate the technical condition of cables, are presented. A list of mandatory lists has been defined when performing activities on cable aging management. A methodology is described for lifetime extension of cables, and conditions for extending the service life of cables that are in service are provided. A number of methods of testing cables for aging management are considered: visual inspection of insulation and measurement of crack size, discoloration, etc.; insulation hardness test; insulation chemical analysis; electrical insulation tests; tensile strength measurement; measurement of elongation at break; measurements of dielectric loss at low frequency or sweep frequency; testing by dynamic reflectometry method; AC and DC current impedance measurements. The paper presents results of separate laboratory studies for selected 1 kV representative power cables with PVC insulation of SUNPP-1, ZNPP-1 and KhNPP-2 conducted within Ukrainian NPP long-term operation, which included a stage of laboratory examination and examination of cable samples in operating conditions. The following results were obtained: dependence of VVGng 4x6 cable lifetime on operating temperature; dependence of AVVG cable lifetime on operating temperature; dependence of AVVG (ng) cable lifetime on operating temperature. There are possibilities and conditions under which the use of cables within long-term operation is permissible.

**Key words:** nuclear power plant, cable, long-term operation, aging

Отримано 11.04.2019