

УДК 621.039.56:629.5+621.039.58:629.5

Продление срока эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов. Обеспечение безопасности в продлеваемый период

О. Э. Дарбинян¹, С. В. Филимошкин²
ФГУП «Атомфлот», Мурманск

Ю. П. Фадеев³, А. Н. Пахомов⁴, В. И. Васюков⁵, Т. В. Молокова⁶
ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова», Нижний Новгород

Рассмотрен и обобщен опыт продления ресурса реакторных установок атомных ледоколов, рассмотрены текущее состояние и перспективы дальнейших работ, влияние работ на ядерную и радиационную безопасность.

Ключевые слова: атомные ледоколы, реакторная установка, назначенный ресурс, продление ресурса, безопасность эксплуатации.

Основные задачи, решаемые атомным ледокольным флотом

Северный морской путь (СМП) — важнейшая транспортная магистраль, формирующая грузопотоки между Европой и Азией и для арктических регионов России.

Специфика СМП состоит в том, что его надежное функционирование в условиях сложной ледовой обстановки и высокая эффективность проведения транспортных операций может быть обеспечена только с использованием мощных атомных ледоколов, имеющих высокую ледопроемкость и автономность плавания.

Работа атомных ледоколов является одним из ключевым факторов защиты геополитических интересов России в Арктике, способствует круглогодичному

функционированию предприятий арктического региона и обеспечению хозяйственной деятельности и жизни населения в районах Крайнего Севера.

Реакторные установки атомных ледоколов и их ресурсные показатели

Россия является единственной страной, обладающей атомным гражданским флотом. В его состав входят следующие атомные суда:

- двухреакторные линейные ледоколы «Ленин», «Арктика», «Сибирь», «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы»;
- ледоколы с ограниченной осадкой «Таймыр», «Вайгач»;
- лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть».

За время существования атомного гражданского флота были созданы и прошли всестороннюю проверку три поколения реакторных установок (РУ): ОК-150, ОК-900 (ОК-900А) и КЛТ-40 (КЛТ-40М) разработки Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И. И. Африкантова («ОКБМ Африкантов»):

- двухреакторная установка ОК-900 (после замены трехреакторной ОК-150) ледокола «Ленин» (рис. 1 и 2);

¹ e-mail: darbinvanoe@rosatomflot.ru.

² e-mail: filimoshkinsv@rosatomflot.ru.

³ e-mail: fadeev@okbm.nnov.ru.

⁴ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.

⁵ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.

⁶ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.



Рис. 1. Первое поколение судовых реакторных установок (ОК-150)

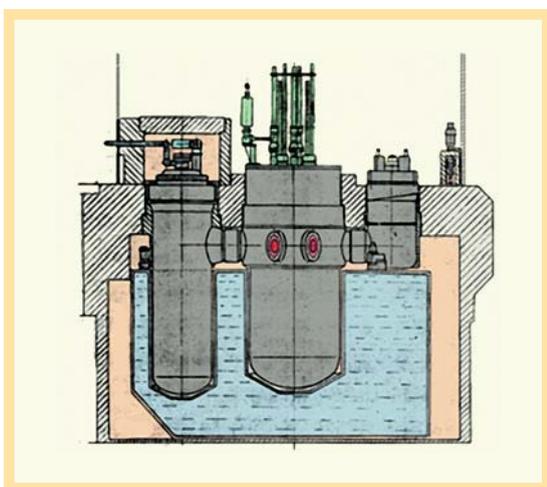
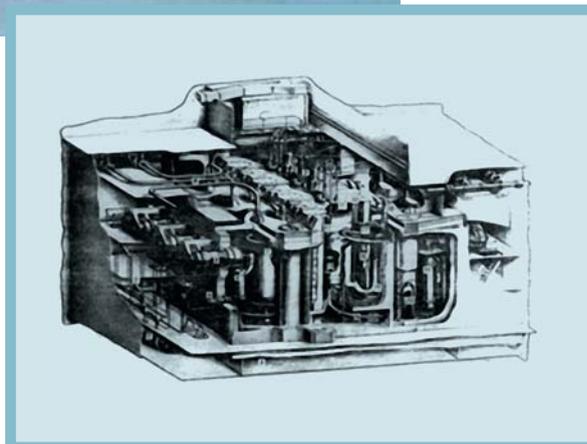


Рис. 2. Второе поколение судовых реакторных установок (ОК-900)





Рис. 3. Второе поколение судовых реакторных установок (ОК-900А)

- двухреакторная установка ОК-900А ледоколов «Арктика», «Сибирь», «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы» (рис. 3);
- однореакторные установки КЛТ-40М и КЛТ-40 соответственно ледоколов с ограниченной осадкой «Таймыр», «Вайгач» и лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть» (рис. 4).

На протяжении всего указанного периода ОАО «ОКБМ Африкантов» осуществляет авторский надзор за изготовлением, испытаниями и эксплуатацией РУ, совершенствует их по мере накопления опыта, учитывает вновь введенную нормативную базу, занимается продлением сроков эксплуатации установок совместно с ФГУП «Атомфлот».

Учитывая современное состояние атомного флота, промышленности и опыт строительства действующих атомных ледоколов, необходимый резерв времени на создание атомных ледоколов нового поколения для полноценного функционирования арктической транспортной системы может быть обеспечен только за счет существенно продленных сроков эксплуатации действующих атомных ледоколов. Решение этой важной научно-технической задачи (в том числе и в отношении ядерных энергетических установок — ЯЭУ и реакторных установок) является весьма актуальным и определяющим для государственных задач России в Арктике.

Первоначально назначенный ресурс РУ первого поколения ОК-150 ледокола «Ленин», учитывая отсутствие опыта эксплуатации, составлял 26 тыс. ч и был выработан в течение шести навигаций. С учетом полученного опыта после модернизации ледокола «Ленин» и установки РУ второго поколения ОК-900 для ее систем и оборудования первоначально был назначен ресурс 25—30 тыс. ч, а затем по

мере накопления опыта он поэтапно продлялся до 50—100 тыс. ч.

Аналогичные ресурсные показатели были назначены для систем и оборудования РУ второго и третьего поколений ОК-900А, КЛТ-40М и КЛТ-40, установленных на ледоколах «Арктика», «Сибирь», «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы», «Таймыр», «Вайгач» и «Севморпуть».

Вместе с тем напряженный график эксплуатации атомных ледоколов и связанная с ним достаточно быстрая выработка первоначально назначенных ресурсных показателей поставили на повестку дня вопрос дальнейшего продления срока эксплуатации РУ.

Приобретенный опыт эксплуатации реакторных установок, а также положительные результаты освидетельствований и определения фактического состояния систем и оборудования подтвердили наличие значительных резервов, позволяющих продлить их ресурсные показатели.

Назначенный ресурс РУ 50—100 тыс. ч действующих ледоколов (за исключением «50 лет Победы») был полностью выработан в 2004—2010 гг. (рис. 5).

Своевременно проведенные работы по продлению срока эксплуатации РУ «России», «Таймыра» и «Вайгача» до 150 тыс. ч и срока службы до 30 лет, а РУ «Арктики» — до 175 тыс. ч и 32 лет соответственно позволили продолжить эксплуатацию этих ледоколов и обеспечить до настоящего времени полноценное функционирование арктической транспортной системы.

Для продолжения эксплуатации атомных ледоколов предполагается продлить срок эксплуатации РУ «Ямала» и «Советского Союза» до 150 тыс. ч, срок службы — до 30 лет, а для «Таймыра»



Рис. 4. Третье поколение судовых реакторных установок (КЛТ-40 и КЛТ-40М)

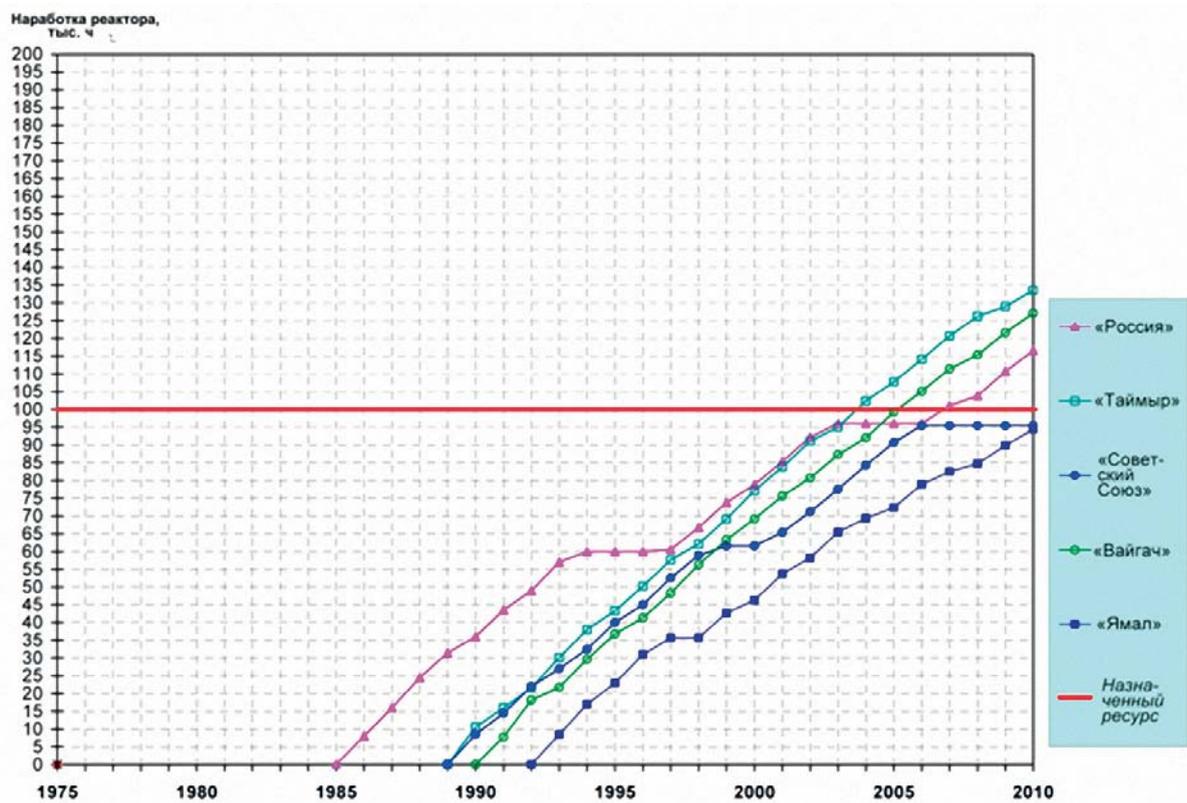


Рис. 5. Ожидаемая выработка назначенного ресурса РУ атомных ледоколов

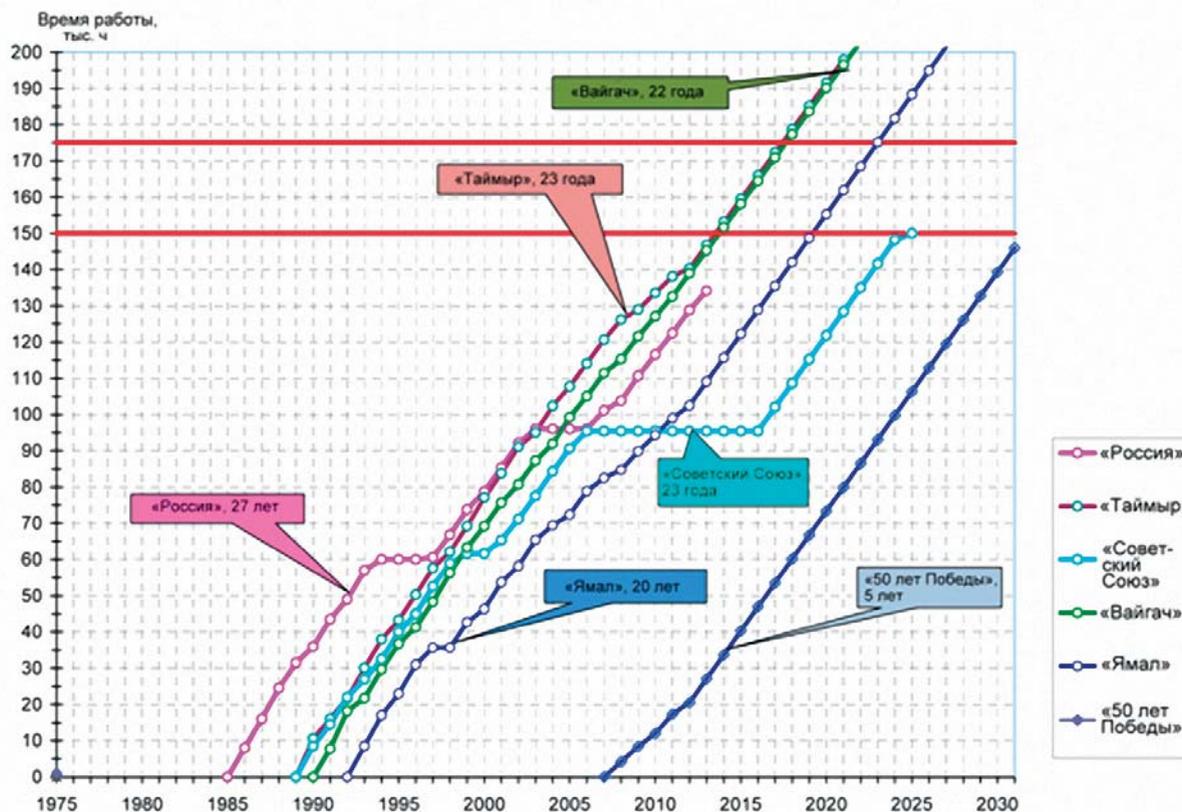


Рис. 6. Ожидаемая выработка продленного ресурса РУ атомных ледоколов

и «Вайгача» — до 175 тыс. ч и 32 лет с возможной перспективой продления до 200 тыс. ч и 40 лет соответственно, что позволит использовать действующий атомный ледокольный флот в Арктике до 2020—2021 гг. (рис. 6).

В связи с выводом из эксплуатации атомных ледоколов «Ленин», «Арктика», «Сибирь», «Россия» продление их срока эксплуатации не предусматривается.

Головной организацией, проводящей работы по подготовке РУ к дополнительному сроку эксплуатации, определена эксплуатирующая организация ФГУП «Атомфлот», в хозяйственном ведении которой находятся атомные ледоколы.

Основными участниками проведения работ наряду с ФГУП «Атомфлот» являются: ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО «ЦНБ «Айсберг», ОАО «СКБК», ЗАО «НПФ «ЦКБА», ФГУП «Аврора», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей».

Опыт отработки и реализации методологии продления сроков эксплуатации реакторных установок

Оборудование и системы реакторных установок атомных судов, работающих в ледовых условиях, испытывают внешние воздействия, связанные с повышенными ударными и вибрационными нагрузками от

работающих механизмов, в условиях частых и глубоких маневров мощности. Кроме того, элементы реакторной установки подвержены термомеханическим, радиационным и другим воздействиям, которые приводят к их повреждаемости, не всегда точно прогнозируемой.

Поэтому методология продления сроков эксплуатации РУ формировалась и совершенствовалась по мере накопления опыта более продолжительной эксплуатации действующих установок, результатов периодических обследований и оценки технического состояния оборудования и систем, информации по их обслуживанию и ремонту, исследований и расчетов.

Базовым положением принятой методологии является поэтапность продления срока эксплуатации реакторных установок, возможность которого определяется по результатам анализа ее работы в предшествующий период и обоснования допустимости эксплуатации в продлеваемый период.

Первоначально продление срока эксплуатации РУ проводилось этапами продолжительностью не более одной навигации (5—6 тыс. ч) на основании результатов освидетельствований, ревизий, расчетных обоснований вплоть до наработки 100 тыс. ч по специально разработанному ОАО «ОКБМ Африкантов» программ.

Результаты проведенных работ подтвердили целесообразность и необходимость поэтапного подхода к продлению срока эксплуатации РУ.

Выполненные исследования и ревизии основного оборудования реакторной установки атомного ледокола «Ленин», проведенные после вывода его из эксплуатации в 1989 г. при наработке 107 тыс. ч, показали, что имеются значительные потенциальные возможности для увеличения назначенных ресурсных показателей реакторных установок. Оборудование и системы РУ ледокола «Ленин» после указанной наработки полностью сохранили работоспособность и возможность дальнейшей эксплуатации.

Опыт эксплуатации РУ других атомных судов и положительные результаты периодических освидетельствований их систем и оборудования также подтвердили наличие значительных резервов для продления ресурсных показателей.

Учитывая положительные результаты исследований и ревизии основного оборудования РУ ледокола «Ленин», результаты эксплуатации РУ других атомных судов в продленный период, Минтранс и Минатом приняли решение о реализации очередного этапа продления, для чего были разработаны:

- «Межотраслевая целевая комплексная программа продления ресурса до 150 тыс. ч и срока службы до 30 лет систем и оборудования РУ атомных судов»;
- «Межотраслевая целевая комплексная программа продления ресурса до 175 тыс. ч и срока службы до 32 лет систем и оборудования РУ атомного ледокола «Арктика»».

По первой программе в 2005—2006 гг. был продлен срок эксплуатации «России», «Таймыра» и «Вайгача», а в настоящее время предполагается продлить срок эксплуатации «Ямала» и «Советского Союза». По второй программе в 2003 г. был продлен срок эксплуатации РУ «Арктики».

На основе разработанной в 2010 г. «Программы комплексного обследования реакторных установок КЛТ-40М атомных ледоколов «Таймыр», «Вайгач»» № УТЭФ-56/57-2010-ПКО-Т/В в настоящее время реализуется этап продления срока эксплуатации РУ «Таймыра», «Вайгача» до 175 тыс. ч и срока их службы до 32 лет с возможной перспективой проведения работ по следующему этапу продления до 200 тыс. ч и 40 лет.

Принятая методология продления срока эксплуатации РУ атомных ледоколов наряду с наличием этапов реализации базируется на абсолютном приоритете обеспечения ядерной и радиационной безопасности, выполнении положений НП-024-2000 «Требования к обоснованию продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии» по обоснованию возможности продления и на выполнении следующих ключевых мероприятий:

- разработки концепции обеспечения безопасности ЯЭУ в продлеваемый период на базе современных требований нормативных документов по безопасности;
- комплексного обследования оборудования и систем РУ для определения их фактического состояния и оценки возможности продления срока эксплуатации;
- устранения дефицита безопасности РУ, определенного по результатам комплексного обследования и анализа соответствия ЯЭУ требованиям общих положений безопасности НП-22-2000 и правил ядерной безопасности ПБЯ-029-01, содержащего конкретные организационные, технические и компенсирующие мероприятия по обеспечению безопасности ЯЭУ каждого судна;
- разработки программы подготовки РУ к дополнительному сроку эксплуатации, включающей оценку остаточного ресурса элементов и меры по его восстановлению, технические и организационные меры по исключению или ограничению дефицитов безопасности с учетом компенсирующих мер, проведение испытаний и корректировку эксплуатационной документации (при необходимости);
- разработки отчета о результатах комплексного обследования с расчетным обоснованием, подтверждающим возможность безопасной эксплуатации РУ в течение продлеваемого периода;
- оформления решения о возможности эксплуатации РУ атомного ледокола в продлеваемый период.

Правильность и эффективность принятой методологии продления подтверждена многолетним положительным опытом эксплуатации РУ действующих атомных ледоколов в продленный период.

Практика продления срока эксплуатации реакторной установки, ее оборудования и систем

В связи с тем, что РУ большинства действующих атомных ледоколов были созданы в 1970—1980-е годы на основе существовавшей в то время нормативной базы (ПБЯ 08-81 и др.), первоочередной задачей проведенных продлений срока эксплуатации являлось обеспечение безопасности РУ в продлеваемый период путем устранения (ограничения) дефицитов безопасности, выявленных при анализе соответствия ранее принятых технических решений современной нормативной документации:

- НП-022-2000 «Общим положениям обеспечения безопасности ядерных энергетических установок судов»;
- НП-029-01 «Правилам ядерной безопасности ядерных энергетических установок судов»;
- НП-024-2000 «Требованиям к обоснованию продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии»;
- НРБ-99 «Нормам радиационной безопасности»;

- ОСПОРБ-99 «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности»;
- специальным нормам и правилам более низкого уровня.

В результате анализа были выявлен ряд отступлений, разработан и согласован с надзорными органами объем технических, организационных и компенсирующих мер, допускающих эти отступления, разработаны и согласованы решения о внедрении мероприятий по повышению безопасности ЯЭУ атомных судов.

В соответствии с указанными решениями уровень безопасности ЯЭУ действующих атомных ледоколов был доведен до уровня современных требований за счет внедрения следующих наиболее важных мероприятий:

- внедрена импульсная пусковая аппаратура для обеспечения на более ранней стадии контроля за реактором, находящимся в подкритическом состоянии;
 - внедрены приводы компенсирующей группы, обеспечивающие «самоход» (опускание поглощающих стержней в активную зону реактора при обесточивании);
 - доработана система аварийного охлаждения активной зоны в части дублирования каналов и резервирования элементов внутри канала;
 - внедрена страховочная система ввода жидкого поглотителя в реактор;
 - внедрена пассивная система расхолаживания РУ при полном обесточивании;
 - установлена вторая (дублирующая) арматура в смежных с первым контуром системах (принцип единичного отказа) для локализации возможных течей;
 - доработана система управления в части улучшения режимов и обеспечения функционирования модернизированных систем и оборудования;
 - разработаны технические обоснования безопасности РУ, подтверждающие ее соответствие современным требованиям;
 - разработаны перечни регламентных проверок элементов, влияющих на ядерную безопасность при работе РУ на мощности, обеспечивающих высокую степень их готовности к работе;
 - внедрены в эксплуатационную документацию «щадящие» режимы, снижающие вносимую при эксплуатации повреждаемость в наиболее напряженные элементы РУ.
- Одновременно с решением вопросов повышения уровня безопасности как необходимое условие продления сроков эксплуатации оборудования и систем ЯЭУ был реализован комплекс следующих научно-технических мероприятий:
- созданы средства неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных швов оборудования и трубопроводов, использующие спектрально-акустический метод и ультразвуковой контроль;
 - разработаны и внедрены уникальная технология и оборудование для вырезки образцов из корпуса реактора, замены внутренних устройств парогенераторов (ПГ) и выемных блоков реакторов;
 - проведены исследования свойств конструкционных материалов (перлитной и нержавеющей стали, титановых и циркониевых сплавов) на образцах, вырезанных из оборудования и трубопроводов РУ «Ленина» (корпуса, крышки, блока выемного реактора, трубопроводов системы компенсаторов давления (КД), холодильника фильтра); трубных систем ПГ «Вайгача» и «Сибири»; насосов, крышки реактора, арматуры, трубопроводов системы КД «Арктики»; результаты исследований учитывались при оценке остаточного ресурса;
 - проведены металловедческие исследования наиболее ответственных элементов реактора: главных патрубков, металла корпуса в районе активной зоны, сварного шва, подверженных при эксплуатации нейтронному облучению, которые не выявили существенных изменений свойств материалов или каких-либо развивающихся дефектов;
 - проведены работы по дополнительному облучению, испытаниям и исследованию материалов образцов, вырезанных из корпуса реактора «Ленина», для обоснования радиационного ресурса аналогичной стали корпусов реакторов РУ действующих атомных ледоколов при продленном сроке эксплуатации;
 - выполнены комплексные обследования систем и оборудования ЯЭУ с применением неразрушающих методов контроля, определением элементов, выработавших свой ресурс и подлежащих замене, и элементов, ресурс которых может быть продлен с учетом их периодического обслуживания и ремонта;
 - выполнен анализ причин неисправностей, отказов, имевших место при эксплуатации ЯЭУ, и приняты меры по их сокращению; наиболее серьезные из имевших место отказов — течи трубопроводов системы КД, системы очистки и расхолаживания из-за наличия значительных термомеханических и вибрационных нагрузок, а также течи трубных систем ПГ, связанные с наводораживанием титановых сплавов;
 - произведен сбор и анализ информации по опыту эксплуатации систем, оборудования и РУ в целом, на базе которой были разработаны фактические и прогнозируемые модели их эксплуатации;
 - разработаны программы управления ресурсом, позволяющие производить корректировку моделей эксплуатации систем и оборудования ЯЭУ и введение в эксплуатационную документацию так называемых щадящих режимов для снижения нагруженности узлов, лимитирующих ресурс и срок службы;
 - выполнены расчеты повреждаемости систем и оборудования РУ на базе современных математических моделей, методов и компьютерных программ, учитывающих процессы реального деформирования,

накопления и развития повреждений конструкционных материалов.

Полученная с помощью традиционных и новых средств диагностирования информация о техническом состоянии критических узлов оборудования и систем РУ, комплекс материаловедческих исследований, экспериментальных и расчетных работ позволили оценить степень деградации их технического состояния и обосновать безопасный для эксплуатации остаточный ресурс.

На базе результатов работ по повышению уровня безопасности ЯЭУ до современных требований и комплекса научно-технических мероприятий разработаны определяющие (в рамках продления) документы: программы подготовки РУ к дополнительному сроку эксплуатации и отчеты о результатах комплексного обследования оборудования, систем и РУ в целом, на основании которых оформлены решения о продлении срока их эксплуатации, завершающие процедуру подготовки РУ каждого атомного ледокола к эксплуатации в течение дополнительного срока.

Многолетняя практика проведения работ по продлению сроков эксплуатации атомных ледоколов и опыт их эксплуатации свидетельствуют об эффективности и достаточности комплекса мер по обеспечению необходимого технического состояния и безопасности эксплуатации ЯЭУ в продленный период на уровне современных требований.

Экономическая эффективность продления срока эксплуатации

Экономический эффект от эксплуатации атомных ледоколов за пределами первоначально назначенных показателей можно оценить, исходя из предположения о выполнении их работы в этот период дополнительно построенными атомными ледоколами с аналогичными назначенными ресурсными показателями.

На основании этого предположения проведена оценка экономического эффекта на примере продления ресурса ЯЭУ со 100 тыс. ч до 150 тыс. ч для ледоколов «Россия», «Таймыр», «Вайгач» и до 175 тыс. ч для ледокола «Арктика». Продолжение их работы в продлеваемый период эквивалентно сроку эксплуатации двух дополнительно построенных атомных ледоколов данного типа.

Если для продления срока эксплуатации атомных ледоколов предусматривается проведение их заводского ремонта, по экспертной оценке затраты на его проведение будут составлять около 20% стоимости одного атомного ледокола. При этом фактические затраты на проведение работ по продлению срока эксплуатации действующих атомных ледоколов составили менее 10% стоимости одного атомного ледокола.

Одновременно экономический эффект от эксплуатации атомных ледоколов в продлеваемый период заключается в том, что их работа способствует

полноценному и безопасному проведению транспортных операций, обеспечивающих стабильную и экономически эффективную хозяйственную деятельность промышленных предприятий Крайнего Севера, а также своевременную и экономически оправданную доставку грузов российским и зарубежным заказчикам.

Литература

1. Панов Ю. К., Васюков В. И., Голубева Д. А. История, настоящее и будущее судовых РУ разработки ОАО «ОКБМ Африкантов». — Доклад на заседании Ядерного общества РФ и ФГУП «Атомфлот», Мурманск, 2 декабря 2009 г.
2. Петрунин В. В., Фадеев Ю. П., Панов В. А. и др. Продление срока эксплуатации и повышение безопасности судовых реакторных установок // Атом. энергия. — 2012. — Т. 113, вып. 6. — С. 328—333.
3. Бахметьев А. М., Сандлер Н. Г., Былов И. А. и др. Анализ возможных причин и механизмов отказов трубных систем парогенераторов атомных судов // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 3 (11). — С. 97—101.