

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125

## FEATURES OF MANEUVERABLE OPERATION MODES OF NUCLEAR ICEBREAKERS REACTOR INSTALLATIONS WHEN WORKING IN THE ARCTIC

**V. I. Korolev**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*It is noted that the requirements for the reactor installations of new atomic icebreakers of 22220, 10510, 10570 projects suggest an increase in safety (reliability), efficiency and maneuverability. At the same time, the maneuverability of reactor installations in specific features is limited and does not have an unambiguous connection with the maneuverability of the nuclear energy installation in general and rowing electric motors in particular. For this, the separate principle of controlling the reactor and steam turbine installation is implemented on the projects of atomic icebreakers. It is indicated that the development of new projects of atomic icebreakers with increased consumer properties requires processing the statistical information based on the results of the operation of atomic icebreakers of already implemented 10520, 10521, 10580 projects with various input terms and the duration of operation in the Arctic. This allows us to ensure the development of a reasonable approach when determining the operation of atomic icebreakers. It is noted that in order to compare maneuvering operating modes of reactor installations of individual icebreakers and the development of generalizing characteristics, information obtained from specific icebreakers is required. The collection of statistical data from the organized on all nuclear icebreakers and grouped materials are annually received for processing and generalization in the «OKBM Africantov». Assignment calculations are made on statistical information accumulated from 1975 to 2000 by the quantity and depth of change in reactors power when working in the Arctic conditions. A new approach to taking into account the number of equivalent cycles during maneuvering the reactor installation is proposed in the paper. In features of the existing approach with the determination of the above number of cycles in a new approach, the significance of the sublayer is taken into account by the impact on the reliability of the active zone. It is shown that this approach gives a more adequate assessment of the active zone resource expenditure during the campaign. The evaluation of the cycles density of the reactor installation power changing over the reporting period of time is also proposed. It is shown that at maneuverable operation of individual icebreakers there are an individual emphasis and increased maneuverable load of single-reactor icebreakers in relation to dual-reactor.*

*Keywords: inertial objects, maneuvering ability, reactor installation, main turbogenerator, rowing electric motor, separate control, maneuvering restriction, warm-up state, critical elements, technical conditions, active zone, pipe system, corps structures, permissible number of cycles.*

### For citation:

Korolev, Vladimir I. "Features of maneuverable operation modes of nuclear icebreakers reactor installations when working in the Arctic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.1 (2023): 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125.

УДК 629.12-8:621.039

## ОСОБЕННОСТИ МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

**В. И. Королёв**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В работе отмечается, что требования, предъявляемые к реакторным установкам новых атомных ледоколов пр. 22220, 10510, 10570, предполагают повышение безопасности (надежности), экономичности и маневренности. При этом маневренность реакторных установок по специфическим особенностям ограничена и не имеет однозначной связи с маневренностью ядерной энергетической установки в целом и гребных*

электродвигателей в частности. С этой целью в проектах атомных ледоколов реализуется отдельный принцип управления реакторной и паротурбинной установки. Указывается, что при разработке новых проектов атомных ледоколов с повышенными потребительскими свойствами требуется обработка статистической информации по результатам эксплуатации атомных ледоколов, реализованных в пр. 10520, 10521, 10580 с различными сроками ввода и продолжительностью эксплуатации в Арктике, что позволяет обеспечить выработку обоснованного подхода при определении модели эксплуатации атомных ледоколов. Отмечается, что для сопоставления маневренных режимов эксплуатации реакторных установок отдельных ледоколов и разработки обобщающих характеристик необходима информация, получаемая с конкретных ледоколов. Сбор статистических данных организован на всех атомных ледоколах и сгруппированные материалы ежегодно поступают для обработки и обобщения в «ОКБМ Африкантов». Проведены оценочные расчеты на основе имеющейся статистической информации 1975–2000 гг. по количеству и глубине изменения мощности реакторов при работе в условиях Арктики. В статье предложен новый подход к учету количества эквивалентных циклов при маневрировании реакторной установкой. В отличие от существующего подхода с определением приведенного числа циклов новый подход учитывает значимость поддиапазона по воздействию на надежность активной зоны. Показано, что такой подход дает более адекватную оценку расходования ресурса активной зоны в течение кампании. Предложена также оценка плотности циклов изменения мощности реакторной установки за отчетный период времени. Показано, что в маневренной эксплуатации отдельных ледоколов наблюдается индивидуальный характер и повышенная маневренная нагрузка однореакторных ледоколов по отношению к двухреакторным.

**Ключевые слова:** инерционные объекты, способность к маневрированию, реакторная установка, главный турбогенератор, гребные электродвигатели, отдельное управление, ограничение на маневрирование, теплонапряженное состояние, критические элементы, технические условия, активная зона, трубная система, корпусные конструкции, допустимое число циклов.

#### **Для цитирования:**

Королёв В. И. Особенности маневренных режимов эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики / В. И. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125.

### **Введение (Introduction)**

Эффективное использование Северного морского пути (СМП) как транспортной системы для организации круглогодичной транспортировки СПГ и других поставок предполагает привлечение атомных ледоколов. При этом возникают дополнительные требования к маневрированию и средней скорости движения судов на трассе, которая должна быть в среднем не менее 10 уз для обеспечения ритмичности поставок [1].

Особенности взаимодействия ледоколов с крупнотоннажными судами (КТС) определяются соотношением ширины судна и ширины прокладываемого ледоколом (ледоколами) канала. При этом в общем случае канал может быть образован одним или двумя ледоколами [2]. Ширина корпуса КТС должна быть сопоставима с шириной канала. При этом кромки ледяного канала препятствуют процессам раздвигания льда. КТС уплотняет и частично толкает перед собой битый лед в канале, который частично пропускается под корпус. Этот процесс является энергоемким и приводит к возрастанию ледового сопротивления КТС при движении по «широкому» каналу. Результаты модельных испытаний, выполненных в ледовом бассейне Крыловского научного центра [3], показали, что взаимодействие с битым льдом в канале является основным препятствием для повышения скорости движения КТС в «широком» канале. Таким образом, возникают дополнительные трудности для маневренного сопровождения атомными ледоколами судов в Арктике.

Атомный ледокол — это судно, которое должно обладать высокой маневренностью и максимально возможной автономностью. Аналогичными свойствами должна обладать также ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), обеспечивающая движение и обитаемость судна. Поскольку источником энергии на судне является реакторная установка (РУ), значит, на нее также распространяются специфические свойства атомных ледоколов — способность РУ к максимально возможной маневренности и обеспечению приемлемой безопасности (надежности). При этом надежность и маневренность находятся в противоречивой взаимосвязи. Повышение надежности РУ обуславливает

ограничение количества и глубины изменения мощности, количество вводов-выводов установки и т. д. Существует также взаимосвязь между маневренностью и длительностью кампании активной зоны, т. е. количеством заменяемых активных зон в течение всего жизненного цикла РУ [4].

Получение оптимального сочетания необходимых свойств РУ является сложной задачей проектирования, изготовления и эксплуатации атомных ледоколов, поэтому решается постепенно и поэтапно от проекта к проекту. При разработке каждого нового проекта атомного ледокола (пр. 22220, 10510) решается задача повышения маневренности РУ по отношению к предыдущим проектам (пр. 10520, 10521, 10580). Для этого на основании изучения опыта эксплуатации формируется новый комплекс требований к маневренности РУ [5], [6].

С точки зрения маневренности судовую ЯЭУ можно рассматривать как последовательность трех разноинерционных энергетических объектов: ядерного реактора (парогенераторов), главных турбогенераторов (ГТГ) и гребных электродвигателей (ГЭД) [7], [8]. При этом реактор имеет *невысокие маневренные возможности*, ограниченные, с одной стороны, нейтронно-физическими характеристиками активной зоны (температурный и мощностной эффекты реактивности, стационарное и нестационарное отравление ядерного топлива ксеноном). С другой стороны, оборудование РУ по I контуру находится под высоким давлением теплоносителя (воды), что, согласно условиям статической прочности, требует значительной толщины стенок корпусов реактора, парогенераторов, гидрокамер и другого оборудования, находящегося под высоким давлением теплоносителя. В этой связи при изменении температурного режима теплоносителя (варьирование мощностью, разогрев / расхолаживание, срабатывании АЗ, ЭСМ и т. д.) в толстостенных элементах основного оборудования РУ в динамике возникают высокие термические напряжения в пристенной зоне, омываемой теплоносителем, приводящие к знакопеременной пластической деформации металла. Таким образом, при проведении маневров наибольшая повреждаемость характерна для *массивных элементов конструкции* из-за неравномерности их прогрева / охлаждения в глубину.

Наиболее массивным оборудованием в составе РУ являются корпуса реактора, парогенераторов, гидрокамеры ЦНПК, а также емкости систем, находящиеся под давлением теплоносителя. Именно здесь возникают наибольшие термодинамические напряжения, способствующие к накоплению пластической деформации металла и развитию локальных усталостных трещин, которые могут привести в циклических процессах к разгерметизации оборудования I контура (малоцикловая усталость металла). Следовательно, маневренность РУ также ограничивается термоциклической усталостью основного оборудования, включенного в I контур. Назначаемые нормативы по маневрированию РУ в основном определяются условиями эксплуатации активных зон, трубной системы парогенераторов и корпусных конструкций РУ.

Главные турбогенераторы, включающие главные турбоагрегаты (ГТА) и главные электрогенераторы переменного и постоянного тока, обладают *относительно хорошими маневренными возможностями*, превышающими маневренные возможности РУ. Главные электрогенераторы в сочетании с гребными электродвигателями (ГЭД) составляют главную электрическую установку (ГЭУ). При этом ГЭД отличается высокой маневренной способностью, а также возможностью к реверсированию. Из ранее изложенного следует, что передача энергии от РУ к ГЭД (гребным винтам) осуществляется при различных возможностях маневрирования последовательно включенного энергетического оборудования ядерной энергетической установки.

На рис. 1 показана схема согласования мощностей при передаче энергии от основных объектов управления (РУ, ГТГ и ГЭД) на атомных ледоколах. Здесь необходимую мощность РУ по *запросу судоводителя задает инженер-оператор* (из ЦПУ) дистанционно при помощи задатчика режимов (ЗР). Электрогидравлическая система управления при этом изменяет положения питательного клапана (ПК) —  $m_{ПК}$ , и в парогенераторы поступает питательная вода в количестве  $G_{пв}$ . Установленная при этом мощность реактора с учетом коэффициента преобразования энергии является наибольшей возможной мощностью для ГЭУ. Для судоводителя это наибольшая располагаемая мощность, которую называют *ограничением мощности* (ОМ) ГЭУ. При этом курсовая мощность ГЭУ (ГТГ) по условиям движения во льдах задается судоводителем независимо от инженера-оператора РУ путем изменения

положения задатчика мощности (ЗМ). При несоответствии в динамике заданной мощности ГЭД текущей мощности ГТГ частота вращения ротора ГТГ изменяется на величину  $\pm \Delta\omega$ .

Для восстановления необходимой частоты вращения ротора (в соответствии со статической характеристикой регулятора частоты вращения) от датчика частоты вращения (ДЧВ) автоматически поступает сигнал на регулятор частоты вращения (РЧВ), что приводит к перемещению регулирующего клапана (РК) в системе регулирования ГТА (ГТГ). При этом автоматически устанавливается новое положение РК —  $m_{РК}$ , изменяется расход пара в турбину  $G_{РК}$  и ее мощность приводится в соответствие с мощностью нагрузки (ГЭУ), заданной судоводителем.

Допустим, при увеличении судоводителем мощности ГЭУ регулирующий клапан дополнительно откроется, и в ГТА будет поступать большее количество пара. Одновременно должен дополнительно закрыться клапан травления (КТ) в блоке паровых клапанов (маневровое устройство). В результате пар в главном паропроводе (ГП) перераспределяется между приоткрывшимся РК и частично прикрывшимся КТ. Данная процедура происходит при некотором снижении давления в ГП. Чем больше установленная мощность ГЭУ, тем больше открывается РК и одновременно закрывается КТ. При разбалансировании мощностей РУ и ГТГ образуется «избыточный пар», который стравливается из ГП в конденсатор ГТА через дроссельно-увлажнительное устройство (ДУУ), где обеспечивается снижение давления и температуры сбрасываемого из ГП пара. Снижение давления в ДУУ происходит путем дросселирования пара в дырчатых листах, а снижение температуры — за счет смешивания пара с впрыскиваемым холодным конденсатом.

При равенстве заданной мощности ГЭУ, предварительно установленной судоводителем ОМ ГЭУ, давление в ГП снижается до минимума (например, для пр.10521-2,7 МПа), а КТ полностью закрывается. При этом положение РК не изменяется (выставлено заранее в соответствии с предварительно запрошенным судоводителем ОМ ГЭУ). Если заданная судоводителем мощность превышает ОМ ГЭУ, то давление в ГП становится меньше минимально поддерживаемого давления (скользящее давление в ГП). Для недопущения этого в системе управления ЯЭУ имеется функциональная связь между блоком ограничения мощности (БОМ) и измеряемым давлением в ГП (АВ), не допускающая снижение давления в ГП ниже поддерживаемого.

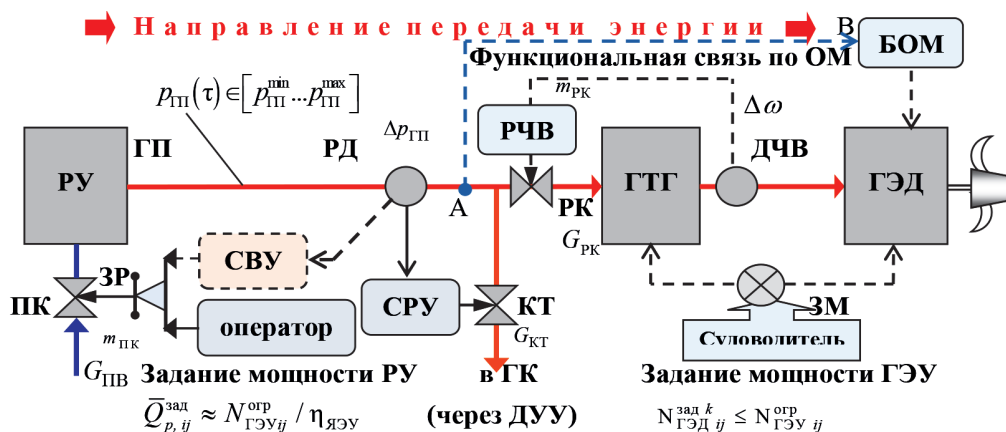


Рис. 1. Принципиальная схема согласования мощностей РУ, ГТГ и ГЭД на атомных ледоколах:  
СРУ — система раздельного управления; СВУ — система взаимосвязанного управления;  
ПК — питательный клапан; ГП — главный паропровод; РК — регулирующий клапан;  
КТ — клапан травления; ГК — главный конденсатор; РУ — реакторная установка;  
ГТГ — главный турбогенератор; ГЭД — гребной электродвигатель; РД — регулятор давления;  
РЧВ — регулятор частоты вращения; БОМ — блок ограничения мощности;  
ДЧВ — датчик частоты вращения; ЗР — задатчик режимов (РУ);  
ЗМ — задатчик мощности (ГЭУ); РД — регулятор давления

Описанный способ управления ЯЭУ атомного ледокола называют *системой раздельного управления* (СРУ) РУ и ГТГ, он считается единственно возможным при работе атомного ледокола во льдах. СРУ РУ и ГТГ связано со значительным «бесполезным травлением» пара, сгенерирован-

ного в РУ, в конденсатор и ускоренным выжиганием ядерного топлива (ЯТ). Однако при этом РУ не требуется повторение всех маневров ГЭД и, соответственно, количество изменений мощности ГЭД будет значительно превышать количество изменений мощности РУ.

В процессе эксплуатации атомного ледокола *главной целью судоводителя считается обеспечение безопасных условий проводки судов в ледовых условиях*. По мнению специалистов Атомфлота, при любой скорости маневрирования РУ останутся режимы с травлением пара (работа с запасом паропроизводительности). Это необходимо для того, чтобы эксплуатационники были уверены в том, что судоводитель предпринял все возможные меры по исключению столкновения судов при проводке в сопровождении ледоколов. Однако при этом актуальными являются вопросы экономии энергозапаса активной зоны и сохранения максимального ресурса оборудования. Если ледокол идет по открытой воде, то целесообразно перейти на систему взаимосвязанного управления (СВУ) РУ и ГЭУ, предусмотренную на всех проектах атомных ледоколов. При такой работе ЯЭУ в статике мощность РУ равна мощности ГЭУ с учетом энергетических потерь на преобразование энергии, длительного травления пара в главный конденсатор не производится, выжигание ЯТ при прочих равных условиях уменьшается, но при этом РУ должна повторять все маневры ГЭД. При работе атомных ледоколов с другими судами СВУ никогда не использовалась, поскольку в этом случае *приоритетным требованием является обеспечение безопасности судовождения*, за которую отвечает персонально капитан судна.

При СРУ РУ и ГТГ заданная РУ мощность (установленная мощность) на текущем (контрольном) интервале времени  $\Delta\tau_j$ , составляет величину  $Q_{pj}^{уст}$ , как правило, превышающую мощность, необходимую в данный момент для работы ГЭУ на величину  $\Delta Q_p^{оп}(\Delta\tau_j)$  — оперативный запас мощности на маневрирование. При этом возможны следующие варианты:

$$Q_{p,j}^{уст} - \frac{N_{ГЭУ}(\Delta\tau_j)}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп}(\Delta\tau_j) \geq 0; \quad (1)$$

$$Q_{p,j}^{уст} - \frac{N_{ГЭУj}^{ом}}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп} = 0, \quad (2)$$

где  $N_{ГЭУ}(\Delta\tau_j)$  — мощность ГЭУ на интервале времени  $\Delta\tau_j$ ;

$\bar{\eta}_{ЯЭУj}$  — средний КПД ЯЭУ на контрольном интервале времени.

Величина  $\Delta Q_p^{оп}(\Delta\tau_j)$ , при эксплуатации атомных ледоколов во льдах может изменяться в широких пределах и определяется, как правило, интуитивно судоводителем из условия обеспечения безопасности мореплавания [4]. При этом судоводитель ориентируется на ОМ ГЭУ —  $N_{ГЭУj}^{ом}$  введенного на интервале времени  $\Delta\tau_j$  при котором оперативный запас мощности РУ по отношению к установленной инженером-оператором равен нулю:  $\Delta Q_{p,j}^{оп} = 0$  (формула (2)).

### Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении анализа работы активных зон и оборудования РУ атомных ледоколов оцениваются ряд отчетных показателей за нормативный промежуток времени (календарный год, кампанию активной зоны и т. д.):

- энерговыработка  $j$ -й активной зоны  $W_p^j$ , ГВт·ч;
- время работы  $j$ -й активной зоны на мощности  $\tau_k^j$ , ч;
- средняя мощность РУ,  $\bar{Q}_p$  МВт;
- средний коэффициент загрузки оборудования (использования номинальной мощности)  $\phi_m$ ;
- средний коэффициент использования календарного времени  $\phi_k$ ;
- энерговыработка за эффективный год  $W_{p\text{эф}}^{\text{год}}$ , ГВт·ч;
- общее время работы реактора данного судна на мощности,  $\sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j$ , ч;
- суммарная энерговыработка РУ  $\sum_{j=1}^{n_1} W_p^j$ .

Средняя мощность РУ за время эксплуатации оценивается по формуле

$$\bar{Q}_p = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} W_p^j}{\sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j} \quad (3)$$

Средний коэффициент использования номинальной мощности

$$\Phi_M = \frac{1}{Q_{p0}} \sum_{j=1}^{n_1} W_p^j \tau_k^j \quad (4)$$

Средний коэффициент использования календарного времени

$$\Phi_k = \frac{1}{T_k^j \cdot 8760} \sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j \quad (5)$$

Энерговыработка РУ за эффективный год (учитывается только время работы на мощности)

$$W_{p \text{ эф}}^{\text{год}} = 8760 \frac{\sum_{j=1}^n W_p^j}{\sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j} \quad (6)$$

где  $T_k^\Sigma$  — полное количество календарных лет эксплуатации реактора (с учетом простоев);

$Q_{p,0}$  — номинальная мощность реактора;

8760 — количество часов в календарном году;

$n_1$  — количество загруженных в реактор активных зон.

Для активных зон существуют ограничения по количеству и размаху циклов изменения мощности, предусмотренные техническими условиями (ТУ). При этом рассматривается количество допустимых циклов при глубине изменения мощности  $\pm 25$  МВт. В реальной эксплуатации изменение мощности РУ могут быть больше регламентируемой величины ( $\pm 25$  МВт), поэтому, согласно предложению «ОКБМ Африкантов», определяется количество приведенных циклов изменения мощности по сумме перемещений ПК. При общем количестве изменений  $N$  сумму перемещений ПК можно записать в следующем виде:

$$\sum_{i=0}^N m_{\text{ПК}_i} = m_{\text{ПК}_0} + \sum_{i=1}^N \left( m_{\text{ПК}_0} + \sum_{i=1}^N \Delta m_{\text{ПК}_i} \right) \quad (7)$$

а приведенное число циклов изменения мощности можно представить в виде

$$z_{\text{ц}}^{\text{пр}} = \frac{171}{50 \cdot 100} \sum_{i=1}^N m_{\text{ПК}_i} = 0,034 \sum_{i=1}^N m_{\text{ПК}_i} \leq [z_{\text{ц}}^{\text{пр}}] \quad (8)$$

где  $m_{\text{ПК}_i}$  — относительное положение ПК для  $i$ -го режима работы РУ, %;

$\Delta m_{\text{ПК}_i}$  — величина перемещения ПК по отношению к предыдущему положению  $i = 0, 1, 2 \dots N$ ;

$m_{\text{ПК}_0}$  — начальное положение ПК перед измерениями;

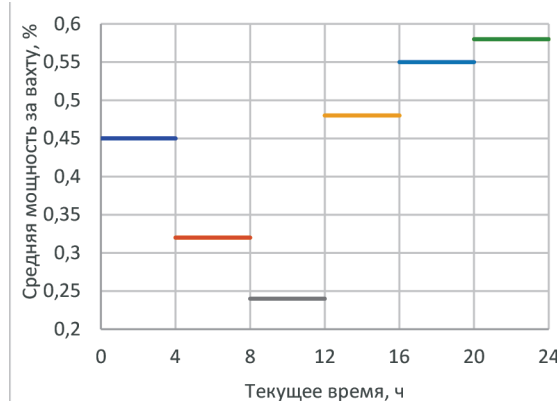
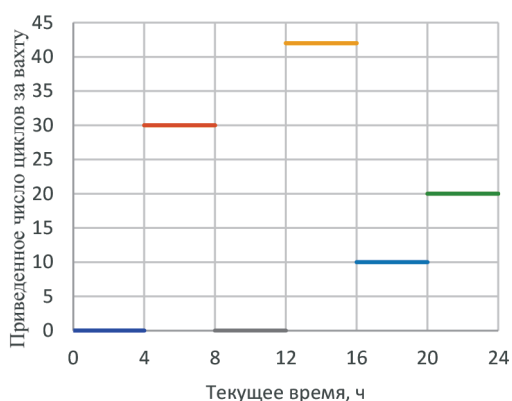
171 — номинальная мощность реактора, МВт;

50 ( $\pm 25$  МВт) — базовый размах изменения мощности РУ в соответствии с ТУ на поставку активных зон или  $\sim 30$  % ( $\pm 15$  %) номинальной мощности активной зоны;

$[z_{\text{ц}}^{\text{пр}}]$  — допустимое число приведенных циклов изменения мощности в соответствии с ТУ на поставку активных зон.

На рис. 2 в качестве примера приведена случайная выборка суточной работы РУ атомного ледокола «Вайгач» в маневренном режиме в весенне-летний период эксплуатации. В течение вахты (4 ч) определяется приведенное число циклов по перемещению питательного клапана (формула (8)) и средняя мощность РУ (активной зоны) по суммарной энергоснабжению. Сумма перемещений ПК отмечается оператором РУ в почасовом и вахтенном журнале наблюдений.

а)



б)

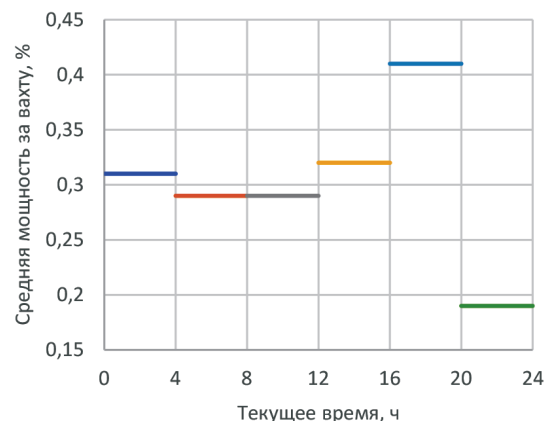
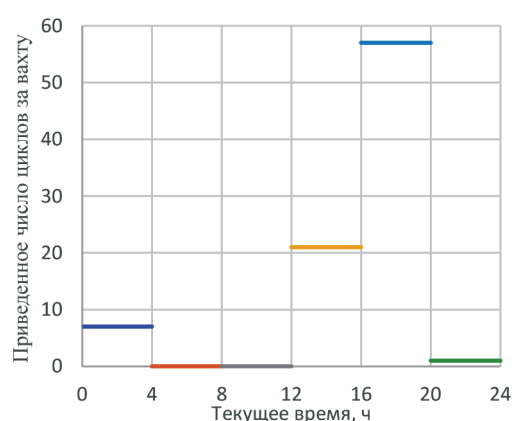


Рис. 2. Результаты наблюдений за суточный работой РУ а/л «Вайгач»:

- а — сумма приведенных циклов за сутки  $z_{пр} = 102$  (07.05.2000 г.) —  
среднесуточная относительная мощность 0,43;  
б — сумма приведенных циклов за сутки  $z_{пр} = 86$  (16.07.2000 г.) —  
среднесуточная относительная мощность 0,3

Из приведенной выборки следует, что перемещение ПК в течение вахт весьма неравномерное. Некоторые вахты проходят без изменения положения ПК, а другие, наоборот, при частом изменении положения ПК. Данное обстоятельство можно объяснить различием ледовой обстановки для конкретной вахты, а также индивидуальным подходом вахтенного персонала к вопросам маневрирования РУ. Из приведенных данных наблюдения следует, что отсутствие перемещений ПК может быть при относительно высокой средней мощности, что указывает либо на стабильность ледовой обстановки, либо на увеличенное травление пара через КТ. Отсутствие перемещений ПК при малой средней мощности указывает на работу РУ в стояночном режиме. В целом количество перемещений ПК и средняя мощность РУ снижаются в летний период эксплуатации.

В табл. 1 приведена выборка перемещений ПК при эксплуатации а/л «Вайгач», откуда следует, что большая часть маневров мощности РУ осуществляется за пределами, регламентированными техническими условиями на поставку активных зон. Из формулы (7) следует, что при учете перемещений клапана несколько раз учитывается величина перемещения ПК по отношению к предыдущему положению и начальное положение ПК. Кроме того, при изменении положения ПК 15 раз ( $N = 15$ ) количество приведенных циклов, вычисленных по формуле (8), равно 27. При этом количество перемещений ПК, превышающее базовую глубину изменения  $\pm 15\%$ , составляет 10, количество перемещений ПК, превышающее базовую амплитуду изменения  $30\%$  — 4. Таким образом, возникает противоречивая ситуация: эксплуатационники предоставили информацию о двадцати

семи приведенных циклах, влияющих на надежность активной зоны, но при этом было всего выполнено пятнадцать изменений положения ПК, причем базовую глубину превысили только десять измерений, а базовую амплитуду — всего четыре.

Таблица 1

**Случайная выборка перемещений ПК  
при эксплуатации а/л «Вайгач» в период 7–10 мая 2000 г.**

| Наименование                                                      | Обозначение                                | Последовательность измерений на а/л «Вайгач», $i$ |      |     |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|
|                                                                   |                                            | 0                                                 | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| 1. Положение ПК, %                                                | $m_{ПК, i}$                                | 46                                                | 24   | 56  | 66   | 30   | 56   | 50   | 24   |
| 2. Изменение положения ПК по отношению к предыдущему измерению, % | $\Delta m_{i+1} = m_{i+1} - m_i$           | –                                                 | –22  | 32  | 10   | –36  | 26   | –6   | –26  |
| 3. Сумма положений ПК                                             | $\Sigma m_{ПКi}$                           | 46                                                | 70   | 126 | 192  | 222  | 278  | 328  | 352  |
| 4. Количество приведенных циклов                                  | $m_{ПК} = 0,034 \sum_{i=1}^{n_i} m_{ПК i}$ |                                                   | 2,4  | 4,3 | 6,5  | 7,5  | 9,4  | 11,1 | 12   |
| Наименование                                                      | Обозначение                                | Последовательность измерений на а/л «Вайгач», $i$ |      |     |      |      |      |      |      |
|                                                                   |                                            | 8                                                 | 9    | 10  | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| 1. Положение ПК, %                                                | $m_{ПКi}$                                  | 56                                                | 66   | 56  | 50   | 24   | 56   | 82   | 56   |
| 2. Изменение положения ПК по отношению к предыдущему измерению, % | $\Delta m_{i+1} = m_{i+1} - m_i$           | 32                                                | 10   | –10 | –6   | –26  | 32   | 26   | –26  |
| 3. Сумма положений ПК                                             | $\Sigma m_{ПКi}$                           | 408                                               | 474  | 530 | 580  | 604  | 660  | 742  | 798  |
| 4. Количество приведенных циклов                                  | $m_{ПК} = 0,034 \sum_{i=1}^{n_i} m_{ПК i}$ | 13,8                                              | 16,1 | 18  | 19,7 | 20,5 | 22,4 | 25,2 | 27,1 |

Рассчитанное количество приведенных циклов дает существенно завышенную консервативную оценку о выполнении предусмотренной ТУ допустимой эксплуатации активных зон. При этом при увеличении глубины изменения мощности количество приведенных циклов снижается, а повреждаемость активной зоны возрастает. Следовательно, предложенный метод не дает возможности провести достаточно убедительный анализ расходования ресурса активной зоны и может лишь косвенно охарактеризовать возможную *повреждаемость активной зоны* от всей совокупности приведенных циклов, поскольку не учитывается *глубина цикла изменения мощности*. Поэтому этот показатель маневренности можно рассматривать как формальный.

В процессе накопления опыта эксплуатации судовых активных зон и совершенствования их конструкции увеличивается количество регламентированных режимов согласно ТУ. В частности, растет количество допустимых циклов изменения мощности реактора (количество маневров) в нормальной эксплуатации с  $2,5 \cdot 10^3$  до  $2,0 \cdot 10^4$  при глубине изменения мощности  $\pm 25$  МВт. Более достоверную информацию о повреждаемости оборудования может дать подсчет количества циклов в определенном поддиапазоне значений изменений мощности (размаха циклов), но для этого необходима паспортная регламентация количества циклов в каждом поддиапазоне мощностей. Для первого этапа развития активных зон [7] проблема осложнялась высокой проектной энергонапряженностью активных зон, конструктивными недоработками, а также отсутствием необходимой статистики. Ввиду этих обстоятельств в течение длительного времени не удавалось обеспечить выработку *назначенного энергоресурса* активных зон [7], [8].

При увеличении глубины изменения мощности растут температурные напряжения и деформации оболочек твэл и топливной композиции. Это, в свою очередь, приводит к интенсификации процессов трещинообразования в оболочках твэл и их преждевременной разгерметизации.

Для определения эквивалентного числа циклов использования загруженной в реактор активной зоны с учетом глубины изменения мощности предлагается следующее соотношение:

$$z_{\text{и}}^{\text{ЭКВ}} = \sum_{i=1}^N k_j n_j f(\Delta Q_j) \leq [z_{\text{и}}^{\text{нп}}], \quad (9)$$

где  $k_j$  — коэффициент значимости  $j$ -го поддиапазона по степени воздействия на ресурс активной зоны;

$n_j$  — количество изменений мощности в  $j$ -м поддиапазоне;

$f(\Delta Q_j)$  — статистическое распределение изменений мощности в  $j$ -м поддиапазоне;

$\Delta Q_j$  — величина (глубина) поддиапазона изменения мощности ( $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ).

На данном интервале времени эксплуатации выделяется общий диапазон глубины изменения мощностей РУ, который делится на количество предполагаемых поддиапазонов. В каждом  $j$ -м поддиапазоне ( $j \in [1, 2, 3, \dots, n_j]$ ) оценивается количество изменений мощности по глубине и статистическое распределение по интервалу количества изменения мощности.

Основными элементами активной зоны, определяющими ее ресурс, являются твэлы. Зона выгружается, когда некоторое количество твэлов теряет герметичность и образуется «открытый уран». В этом случае из топлива вымываются легкорастворимые водой изотопы (например, изотопы йода) и активность теплоносителя растет, усложняя доступ к остановленному или работающему реактору. В работе принимается, что при увеличении глубины изменения мощности напряженное состояние твэл возрастает и, соответственно, снижается энергоресурс активной зоны.

Для учета воздействия глубины изменения мощности на ресурсные характеристики активных зон принята следующая модель нагружения оболочки твэл при изменении режима работы активной зоны (реакторной установки):

– величина перемещения ПК относительно предыдущего положения  $\Delta m_{\text{ПК}i}$  примерно равна величине изменения мощности РУ на данном интервале времени  $\Delta Q_{pi}$ ;

– на оболочку твэл воздействуют эквивалентные напряжения, учитывающие напряжения, возникающие в оболочке из-за изменения ее температуры и деформации ввиду разности линейного расширения оболочки и топливной композиции при увеличении мощности и обратный эффект при уменьшении мощности, т. е.

$$\sigma_t^{\text{ЭКВ}} = \sigma_t^{\text{об}} + \Delta \sigma_t^{\text{об}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_t^{\text{об}}$  — термические напряжения возникающие в оболочке при изменении температуры;

$\Delta \sigma_t^{\text{об}}$  — температурные напряжения, возникающие в оболочке за счет разницы деформации топливной композиции и оболочки.

Выражение (10) можно записать в следующем виде [10]:

$$\sigma_t^{\text{ЭКВ}} = \frac{\beta'_{\text{об}} E'_{\text{об}}}{1 - \mu} \Delta t_{\text{об}}(\Delta Q_{p,i}) + \frac{E'_{\text{об}}}{r_{\text{об}}} \left[ \beta'_{\text{ТК}} r_{\text{ТК}} \Delta t_{\text{ТК}}(\Delta Q_{p,i}) - \beta'_{\text{об}} \delta_{\text{об}} \Delta t_{\text{об}}(\Delta Q_{p,i}) \right]. \quad (11)$$

Перепад температур на оболочке твэл с продольной координатой  $z$  при изменении мощности на величину  $\Delta Q_{p,i}$  можно определить из выражения, приведенного в [8]:

$$\Delta t_{\text{об}}(z, \Delta Q_{p,i}) = \chi_{\text{ТК}} \frac{q_z^{\text{max}} \Delta Q_{p,i}}{\pi d_{\text{об}}^{\text{ТВЭЛ}} \lambda_{\text{об}}} f_q(z). \quad (12)$$

Перепад температур между центральной частью топливной композиции (ТК) и ее наружным диаметром в сечении твэл с координатой  $z$  [8], [9]:

$$\Delta t_{\text{ТК}}(z, \Delta Q_{p,i}) = \chi_{\text{ТК}} \frac{q_z^{\text{max}} \Delta Q_{p,i}}{\pi d_{\text{об}}^{\text{ТВЭЛ}} 2\lambda_{\text{ТК}}} f_q(z), \quad (13)$$

где  $q_z^{\text{max}}$  — максимальная линейная плотность теплового потока в активной зоне, МВт/м;

$f_q(z)$  — функция распределения тепловыделения по высоте активной зоны (твэл);

$\chi_{\text{ТК}}$  — доля энергосодержания в топливной композиции;

$d_{об}^{ТВЭЛ}$  — диаметр оболочки ТВЭЛ;  
 $\delta_{об}$  — толщина оболочки ТВЭЛ;  
 $r_{ТК}$  — радиус топливной композиции;  
 $\lambda_{об}; \lambda_{ТК}$  — удельная теплопроводность материала, соответственно, оболочки ТВЭЛ и топливной композиции;

$\beta'_{об}; \beta'_{ТК}$  — температурный коэффициент линейного расширения материала, соответственно, оболочки ТВЭЛ и топливной композиции при рабочей температуре;

$E'_{об}$  — модуль упругости материала оболочки при рабочей температуре, МПа;

$\mu$  — коэффициент Пуассона.

Коэффициент значимости  $j$ -го поддиапазона по степени воздействия на ресурс активной зоны оценивается из соотношения

$$k_j = \sigma_{t,j}^{ЭКВ} / \sigma_{t,б}^{ЭКВ}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{t,j}^{ЭКВ}; \sigma_{t,б}^{ЭКВ}$  — амплитудные напряжения, возникающие в оболочке ТВЭЛ, соответственно, в  $j$ -м и базовом поддиапазонах изменений мощности.

В дальнейших расчетах по формулам (11)–(14) приняты значения в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

**Механические и теплофизические свойства материала оболочки и ТК**

| Наименование материала | Механические свойства |                         |           | Теплофизические свойства |                     |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|---------------------|
|                        | $E$ , МПа             | $\beta$ , 1/град        | $\mu$ , – | $\lambda$ , Вт/(м·°С)    | $C_p$ , кДж/(кг·°С) |
| Циркониевый сплав Э635 | $97 \cdot 10^3$       | $6,9 \cdot 10^{-6}$     | 0,34      | 18,5                     | –                   |
| Топливная композиция   | $101 \cdot 10^3$      | $(17-20) \cdot 10^{-6}$ | 0,33      | 50                       | 0,590               |

На рис. 3 показаны рассчитанные значения коэффициента значимости  $j$ -го поддиапазона по отношению к базовому поддиапазону, заданному ТУ на поставку активной зоны.

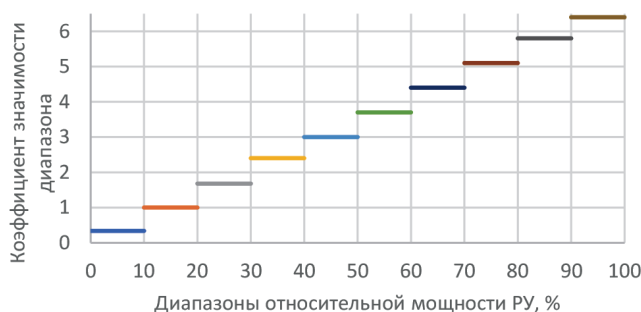


Рис. 3. Значения коэффициента значимости  $j$ -го поддиапазона

Дополнительную информацию об условиях эксплуатации можно получить, введя понятие *средняя плотность эквивалентных циклов на контрольном интервале времени* (вахта, сутки, календарный год, кампания активной зоны), соответственно, на РУ и активную зону:

$$\bar{z}_w = \frac{1}{\varphi_k \tau_k} \sum_{i=1}^N k_j n_j f(\Delta Q_j), \quad (15)$$

где  $\tau_k$  — количество часов работы на  $k$ -м контрольном интервале времени;

$\varphi_k$  — коэффициент использования календарного времени на контрольном интервале времени.

Сопоставление результатов расчетов показывает, что при малых и частых изменениях мощности (малых перемещениях ПК) приведенное число циклов, определенное по формуле (8), будет превышать количество эквивалентных циклов, определенных по формуле (9). Однако при увеличении доли более глубоких изменений мощности по отношению к базовому значению количество

эквивалентных циклов опережает количество приведенных циклов в течение длительного срока эксплуатации РУ и активной зоны.

### Результаты (Results)

В первую очередь интерес представляют показатели, формирующие представления о характере использования реакторных установок и активных зон ледоколов за конкретный период эксплуатации: средняя эксплуатационная мощность, коэффициенты использования номинальной мощности и календарного времени, а также годовая энерговыработка как отдельных ледоколов, так и групп ледоколов (например, с двумя реакторами и одним реактором). На рис. 4 приведены статистические данные работы РУ атомных ледоколов до 2000 г. [11]. Средняя мощность РУ за время эксплуатации с момента ввода до начала 2000 г. по атомным судам находится в диапазоне 55–87 МВт. Наибольшая средняя мощность у ледоколов с одной РУ типа «Таймыр» составляет в среднем 84 МВт, у ледоколов с двумя РУ типа «Россия» средняя мощность — 67 МВт, т. е. средняя мощность загрузки РУ двухреакторных ледоколов меньше средней мощности РУ однореакторных ледоколов. При этом следует отметить появление тенденции к снижению средней эксплуатационной мощности за счет увеличения времени стоянки в труднопроходимых районах арктических морей в ожидании провозки транспортных судов.

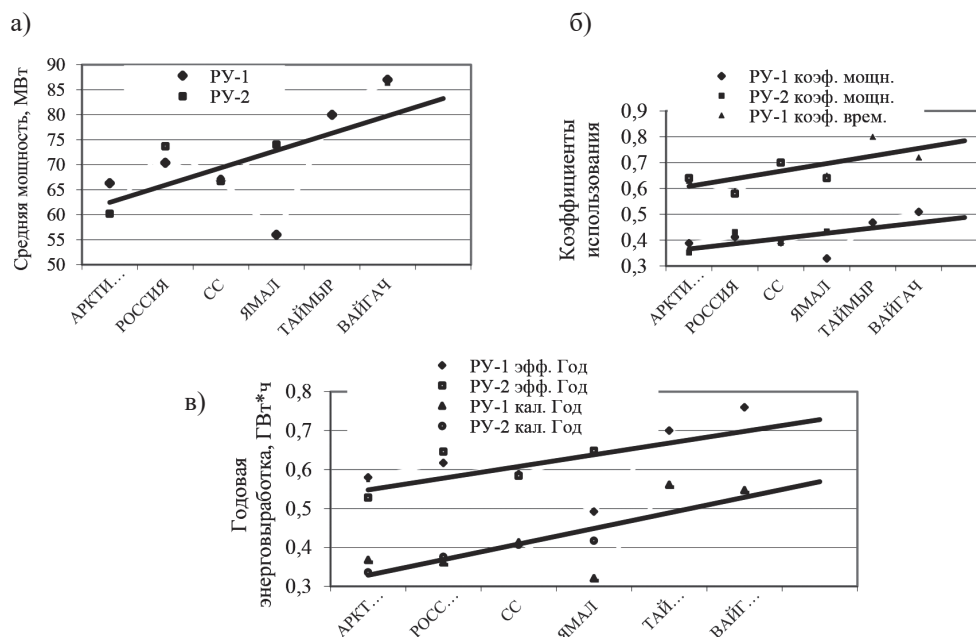


Рис. 4. Статистические данные по работе РУ атомных ледоколов с начала эксплуатации до 2000 г. (включительно): а — средняя мощность; б — коэффициенты использования номинальной мощности и календарного времени; в — годовая энерговыработка

Энерговыработка за эффективный год для ледоколов с двумя РУ находится в пределах 0,5–0,65 ГВт · ч (средняя 0,587 ГВт · ч). Средняя энерговыработка за эффективный год для ледоколов с одним реактором составляет 0,73 ГВт · ч. Таким образом, при более интенсивном выгорании ядерного топлива на однореакторных ледоколах следует ожидать более частых перегрузок топлива. Средняя энерговыработка за календарный год (с учетом вынужденных простоев при неработающем реакторе) для двухреакторных ледоколов составляет 0,374 ГВт · ч, для однореакторных — 0,55 ГВт · ч. Простои в основном связаны с перегрузкой топлива, ремонтом парогенераторов и докованием.

Средний коэффициент использования номинальной мощности для ледоколов с двумя реакторами составляет  $\varphi_m = 0,4$ , для ледоколов с одним реактором —  $\varphi_m = 0,5$ . Коэффициент использования

календарного времени в среднем для ледоколов типа «Россия» составляет  $\varphi_k = 0,64$ , типа «Таймыр» —  $\varphi_k = 0,76$ . При более интенсивном выжигании ЯТ на однореакторных ледоколах увеличивается коэффициент использования календарного времени, однако при этом возрастает время простоев при перегрузке топлива. В целом наблюдается возрастание всех показателей (средняя мощность, коэффициентов использования и годовой энерговыработки) для вновь вводимых атомных ледоколов. Наименьшие показатели из двухреакторных ледоколов для а/л «Арктика» и наибольшие для а/л «Ямал».

На рис. 5 и 6 представлены обобщенные данные режимов эксплуатации парогенераторов на атомных ледоколах за период 1974–2000 гг. по данным [12]. Для атомных ледоколов с двумя РУ характерна длительная работа (37 % времени) в диапазоне мощностей 10–20 %, что соответствует *стояночному режиму ледокола* с работающим реактором. Второй пик соответствует относительной продолжительности работы РУ 23 % общего времени эксплуатации с мощностью РУ в диапазоне 40–60 %. Анализ статистики по режимам использования РУ в процессе эксплуатации ледоколов показывает, что значительное время они находятся в режиме ожидания проводки.

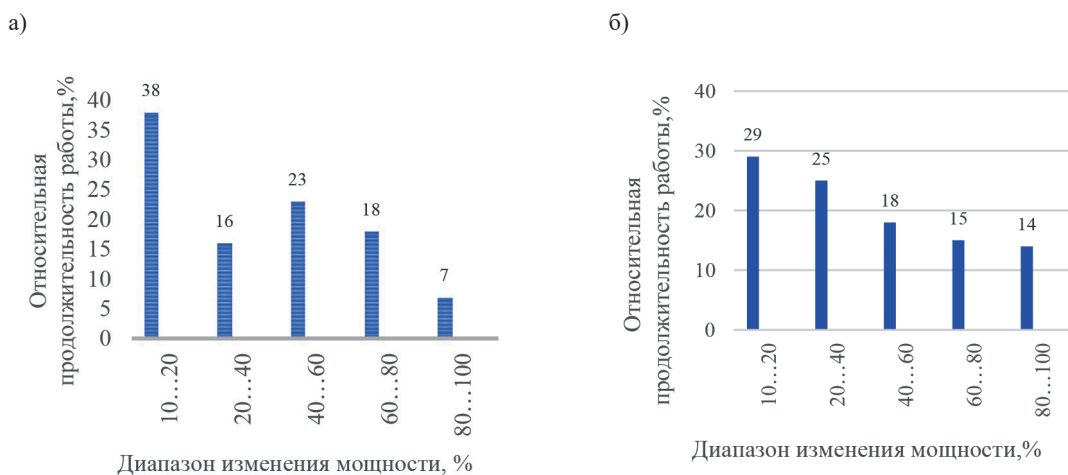


Рис. 5. Обобщенные гистограммы относительной продолжительности работы ПГ (РУ) ледоколов с двумя и одной РУ в заданном диапазоне мощности: а — две РУ; б — одна РУ

Для ледоколов с одной РУ относительное время работы в стояночном режиме составляет около 29 % общего времени. Однако также значительным является время использования РУ в диапазоне мощности 80–100 %, которое составляет около 14 %. В целом характер распределения относительного времени использования РУ в различных диапазонах мощности далек от *нормального закона* и близок к *экспоненциальному закону*. Наибольшее количество изменений мощности (более 80 % от общего числа) парогенераторов ПГ-18 осуществляется с глубиной менее 15 %  $Q_{p0}$ , а с глубиной более 15 %  $Q_{p0}$  составляет менее  $5 \cdot 10^3$  циклов (рис. 6).

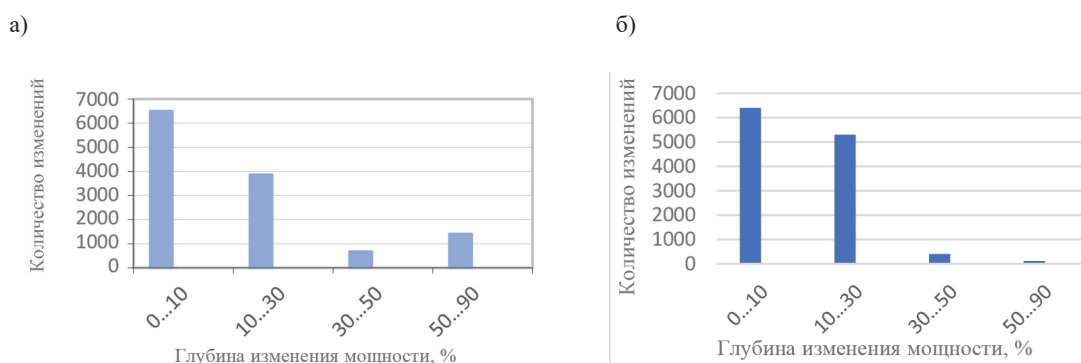


Рис. 6. Обобщенные гистограммы количества изменений мощности ПГ-18 и ПГ-28 на заданную глубину за период 1974–2000 гг.: а — ПГ-18; б — ПГ-28

На рис. 7 показаны гистограммы по количеству изменений мощности РУ в фиксированных диапазонах мощности для ледоколов с двумя и одним реактором, построенные по данным «ОКБМ Африкантов» [11].

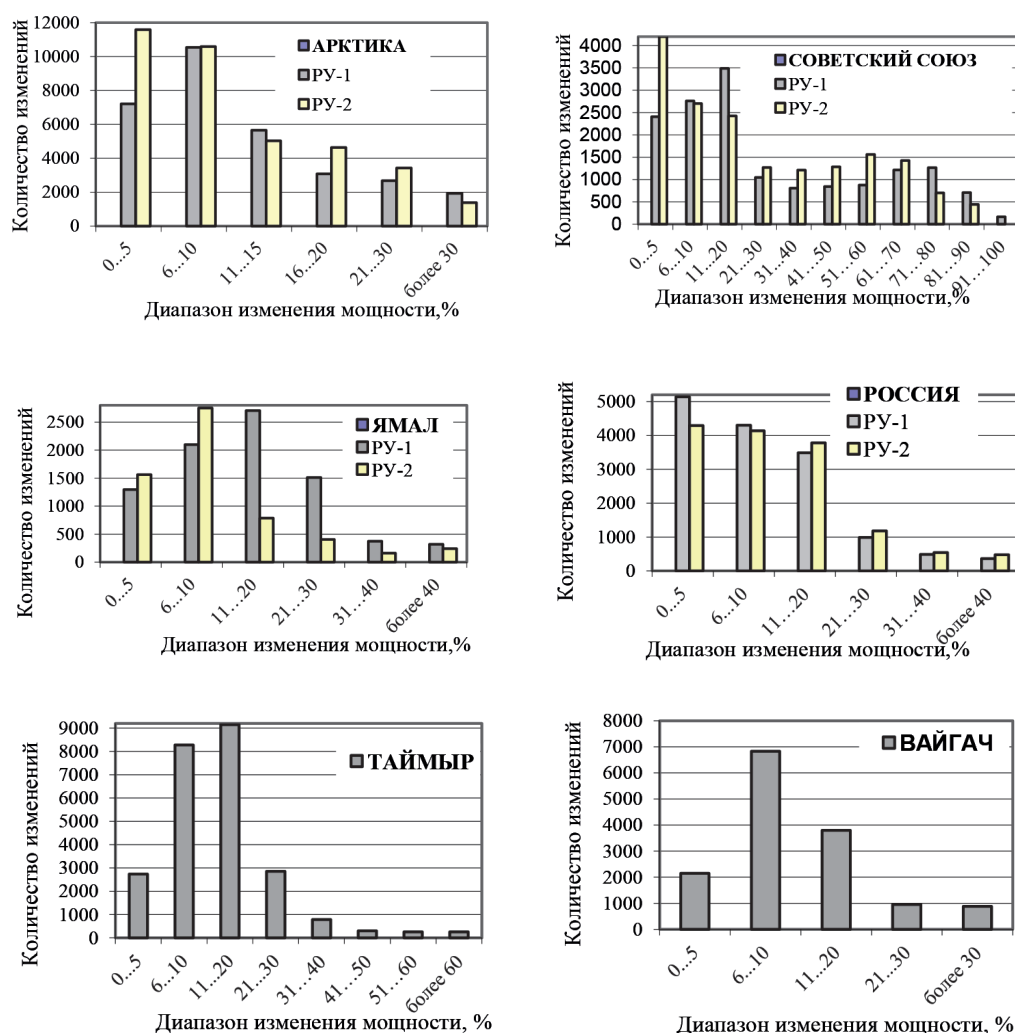


Рис. 7. Количество изменений мощности РУ в фиксированных диапазонах мощности для ледоколов с одним и двумя реакторами

При этом общее количество маневров мощностью возрастает одновременно с длительностью использования ледоколов в Арктике. Однако в относительном сопоставлении режимов можно выявить индивидуальный «подчерк» работы ледоколов в ледовых условиях. В целом наблюдается существенный разброс маневренных режимов использования по отдельным ледоколам, что дает основания для анализа реальных возможностей РУ по маневренности. По ряду ледоколов просматривается статистическое распределение, близкое к нормальному закону, а также экспоненциальному.

### Обсуждение (Discussion)

В табл. 3 приведены результаты оценочных расчетов с использованием формул (4), (5), (9), (15) и статистических данных, приведенных на рис. 7. Следует отметить, что адекватность результатов оценочных расчетов во многом зависит от достоверности предоставляемых ледоколами данных. Например, приведенные статистические данные по маневренности РУ а/л «Советский Союз» отличаются большей детализацией по поддиапазонам изменения мощности РУ. Данные, полученные с а/л «Арктика», «Россия», «Ямал» и «Вайгач», не отражают значительную часть поддиапазонов с глубокими изменениями мощности.

Таблица 3

**Маневренные режимы эксплуатации РУ и активных зон атомных ледоколов  
на момент подведения общих итогов**

| Характеристика                                                                    | Ледоколы         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                                                                                   | Арктика          |                  | Россия           |                  | СС               |                  | Ямал             |                  | Таймыр            | Вайгач           |
|                                                                                   | РУ1              | РУ2              | РУ1              | РУ2              | РУ1              | РУ2              | РУ1              | РУ2              | РУ1               | РУ1              |
| Время эксплуатации, лет                                                           | 25               |                  | 15               |                  | 11               |                  | 8                |                  | 11                | 10               |
| Примерное количество полностью или частично использованных активных зон           | 5                | 5                | 3                | 3                | 2                | 2                | 1,6              | 1,6              | 2                 | 1,8              |
| Коэффициент использования календарного времени                                    | 0,63             |                  | 0,58             |                  | 0,7              |                  | 0,65             |                  | 0,8               | 0,7              |
| Доля изменений мощности в диапазоне 0–15 %                                        | 73               | 75               | 78               | 80               | 50               | 52               | 65               | 80               | 80                | 80               |
| Суммарное количество эквивалентных циклов на РУ                                   | $2,5 \cdot 10^4$ | $2,8 \cdot 10^4$ | $10^4$           | $1,1 \cdot 10^4$ | $3,1 \cdot 10^4$ | $3,2 \cdot 10^4$ | $9 \cdot 10^3$   | $4,5 \cdot 10^3$ | $2,27 \cdot 10^4$ | $1,1 \cdot 10^4$ |
| Среднее количество эквивалентных циклов на активную зону                          | $5 \cdot 10^3$   | $5,6 \cdot 10^3$ | $3,3 \cdot 10^3$ | $3,6 \cdot 10^3$ | $1,5 \cdot 10^4$ | $1,6 \cdot 10^4$ | $5,6 \cdot 10^3$ | $2,8 \cdot 10^3$ | $1,1 \cdot 10^4$  | $0,6 \cdot 10^4$ |
| Средняя плотность эквивалентных циклов изменения мощности на активную зону, 1/сут | 4,4              | 4,9              | 3,1              | 3,4              | 11,9             | 12,7             | 4,7              | 2,4              | 7,6               | 4,8              |

Анализ выполненных изменений мощности в различных поддиапазонах для ледоколов с двумя реакторами позволяет установить, что наибольшее количество этих изменений приходится на поддиапазоны до 15 % номинальной мощности. Если рассматривать конкретные ледоколы по *детализации отчетности*, то наибольшее количество эквивалентных циклов для двухреакторных ледоколов выполнено на а/л «Советский Союз» ( $3,1 \cdot 10^4$ – $3,2 \cdot 10^4$ ), для одnoreакторных — на а/л «Таймыр» ( $2,27 \cdot 10^4$ ). Возможно, что данный результат для ледокола «Советский Союз» получен в результате более полной детализации отчетности по режимам изменения мощности. При этом доля изменений мощности для а/л «Советский Союз» с глубиной до 15 % составляет 50 и 52 % от общего количества, что совсем не характерно для других атомных ледоколов, на которых данные маневры составляют 73–80 % от общего количества изменений мощности.

Наибольшая средняя плотность эквивалентных циклов изменения мощности в сутки на активную зону также характерна для а/л «Советский Союз» и а/л «Таймыр». При этом для остальных ледоколов плотность эквивалентных циклов находится в пределах 3–5 в сутки. Наибольшее среднее эквивалентное число циклов изменения мощности на активную зону с учетом значимости интервала характерно для а/л «Советский Союз» ( $1,5 \cdot 10^4$ – $1,6 \cdot 10^4$ ), и «Таймыр» ( $1,1 \cdot 10^4$ ), причем эти значения меньше предусмотренных для активных зон по ТУ —  $2 \cdot 10^4$ .

Статистический анализ режимов эксплуатации (маневрирования) действующих атомных ледоколов позволяет сформировать адекватную модель эксплуатации для плавучих объектов с ЯЭУ. При этом более детальная модель эксплуатации в технической документации разработана в проекте ПЭБ «Академик Ломоносов», так как условия ее эксплуатации более предсказуемы. Здесь степень детализации проектных условий эксплуатации значительно выше, чем для РУ атомных ледоколов, находящихся в эксплуатации. Регламентированы глубины изменения мощности и диапазоны мощностей, в которых осуществляется маневрирование, количество и скорость работающих ЦНПК, скорость изменения мощности в каждом поддиапазоне и т. д.

Анализ показал, что для эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования РУ установлены различные требования по ее маневрированию и учету. Наибольшие ограничения на маневрирование связаны с активной зоной реактора и трубной системой парогенераторов. Таким образом, выполнение этих требований с большой вероятностью обеспечивают надежность всего оборудования РУ. Однако ледовые условия Арктики требуют большей маневренности от РУ, поскольку при этом увеличиваются экономические показатели атомных ледоколов [4]. При раздельном управлении РУ и ГЭУ за счет повышения маневренности можно добиться лучших технико-экономических показателей эксплуатации ледокола. Кроме того, в данном случае может дать значительный *эффект перехода* на «скользящее» давление в главном паропроводе при отключении функциональной связи АВ (см. рис. 1) [4].

### Заключение (Conclusion)

Проведенные расчетно-теоретические исследования статистических материалов по маневренной эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики показали ряд особенностей. Учет маневренности (количества циклов) по глубине изменения мощности РУ осуществляется на основании оценки количества приведенных циклов *изменения мощности* по сумме перемещений питательного клапана. При этом учитывается базовое изменение мощности, предусмотренное ТУ на поставку активных зон. Показано, что данная оценка ведет к завышенному числу циклов при малой глубине изменения мощности, что можно считать приемлемым при консервативном подходе. Однако при увеличении глубины изменения мощности, когда повреждаемость активной зоны значительно возрастает, данный способ дает заниженную оценку количества приведенных циклов по отношению к базовому значению.

При учете значимости циклов с точки зрения степени воздействия на активную зону, оценивая эквивалентное число циклов, можно получить более адекватную оценку расходования ресурса за кампанию активной зоны. С учетом данного подхода выявлено, что на всех рассмотренных атомных ледоколах («Арктика», «Советский Союз», «Ямал», «Таймыр» и «Вайгач») эквивалентное число циклов не превышает значения заданного ТУ на поставку активных зон. Кроме того, наблюдается индивидуальный подход при маневрировании мощностью РУ на отдельных ледоколах. Исследования показали, что однореакторные ледоколы работают при более высокой средней мощности и количестве эквивалентных циклов изменения мощности РУ, что в большей степени влияет на деградационные процессы в активной зоне, приводя к увеличению количества перегрузок активных зон в течение периода эксплуатации РУ.

Отмечается также, что среднестатистические мощности отдельных реакторов на двухреакторных ледоколах, как правило, регулярно отличаются на величину до 30 %. При этом, как правило, количество маневров, осуществляемых отдельными РУ, также имеют отличия, что свидетельствует о ведущей роли в управлении одного из реакторов. Следует также отметить важность предоставления объективных данных по маневрированию с конкретных ледоколов. Полученные в статье результаты могут быть использованы при проектировании новых ядерных энергетических установок перспективных объектов морской техники гражданского назначения [12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустошный А. В. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике / А. В. Пустошный, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
2. Добродеев А. А. Проводка крупнотоннажных судов ледоколами с увеличенной скоростью: исследования в ледовом бассейне / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 76–83. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-76-83.
3. Добродеев А. А. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

4. Королёв В. И. Повышение экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проводке судов в Арктике / В. И. Королёв // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 2. — С. 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253.
5. Зверев Д. Л. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов [и др.] // Атомная энергия. — 2020. — Т. 129. — № 1. — С. 29–37.
6. Зверев Д. Л. Опыт создания и перспективы развития ядерных энергетических установок для ледокольного флота и энергообеспечения / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов, В. И. Полуниничев // Атомная энергия. — 2018. — Т. 125. — № 6. — С. 318–322.
7. Королёв В. И. Основы эксплуатации и ремонта реакторных установок плавучих объектов с ядерной энергетической установкой: учеб. пособие: в 2 ч. / В. И. Королёв. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — Ч. I. — 312 с.
8. Королёв В. И. Обеспечение надежности ядерных реакторов плавучих объектов при проектировании и эксплуатации: монография / В. И. Королёв, А. Ю. Ластовцев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 204 с.
9. Кириллов П. Л. Справочник по теплоэнергетическим расчетам: (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков; Под общ. ред. П. Л. Кириллова. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 296 с.
10. ПНАЭ Г-7-002-87. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 527 с.
11. Макаров В. И. Опыт создания и эксплуатации реакторных установок гражданских судов / В. И. Макаров, Б. Г. Пологих, Н. С. Хлопкин [и др.] // Атомная энергия. — 2000. — Т. 89. — № 3. — С. 179–189.
12. Кудинович И. В. Ядерные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения / И. В. Кудинович, А. Ж. Сутеева, В. Г. Хорошев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 4 (386). — С. 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.

## REFERENCES

1. Pustoshny, Alexander V., and Kirill E. Sazonov. “Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round arctic operations.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(27) (2017): 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
2. Dobrodeev, Aleksei Alekseevich, and Kirill Evgenevich Sazonov. “Fast-speed escorting of heavy tonnage vessels by icebreakers: researching in ice model tank.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(31) (2018): 76–83. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-76-83.
3. Dobrodeev, Aleksei A., and Kirill E. Sazonov. “Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.
4. Korolev, Vladimir I. “Improving the economic performance of nuclear icebreakers when navigating ships in the Arctic.” *Arctic: ecology and economy* 11.2 (2021): 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253.
5. Zverev, D. L., Y. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, V. Y. Galitskikh, V. I. Polunichiev, K. B. Veshnyakov, S. V. Kabin, and A. Y. Turusov. “Reactor installations for nuclear icebreakers: origination experience and current status.” *Atomic Energy* 129.1 (2020): 18–26. DOI: 10.1007/s10512-021-00706-x.
6. Zverev, D. L., Y. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, and V. I. Polunichiev. “Nuclear power plants for the icebreaker fleet and power generation in the arctic region: development experience and future prospects.” *Atomic Energy* 125.6 (2019): 359–364. DOI: 10.1007/s10512-019-00494-5.
7. Korolev, V. I. *Osnovy ekspluatatsii i remonta reaktornykh ustanovok plavuchikh ob’ektov s yadernoi energeticheskoi ustanovkoi*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019.
8. Korolev, V. I., and A. Yu. Lastovtsev. *Obespechenie nadezhnosti yadernykh reaktorov plavuchikh ob’ektov pri proektirovanii i ekspluatatsii: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.
9. Kirillov, P. L., Yu. S. Yur’ev, and V. P. Bobkov. *Spravochnik po teploenergeticheskim raschetam: (Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)*. Edited by P. L. Kirillov. M.: Energoatomizdat, 1984.
10. Rules and regulations in the nuclear power industry G-7-002-87. Normy rascheta na prochnost’ oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok / Gosatomenergonadzor SSSR. M.: Energoatomizdat, 1989.

11. Makarov, V. I., B. G. Pologikh, N. S. Khlopin, F. M. Mitenkov, Y. K. Panov, V. I. Polunichev, and O. A. Yakovlev. "Experience in building and operating reactor systems for civilian ships." *Atomic Energy* 89.3 (2000): 691–700. DOI: 10.1023/a:1009454731116.

12. Kudinovich, Igor V., Adelina Zh. Suteeva, and Vitaly G. Khoroshev. "Nuclear power plants for advanced civil marine technology." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(386) (2018): 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Королёв Владимир Ильич** —  
кандидат технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf\_snef@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Korolev, Vladimir I.** —  
PhD, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf\_snef@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.  
Received: December 23, 2022.*