ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-254-270 **EDN QXQRIQ**

POSSIBILITY OF APPLYING SLIDING STEAM PRESSURE TECHNOLOGY IN MANEUVERING NUCLEAR POWER PLANTS TO REDUCE NUCLEAR FUEL OVERCONSUMPTION ON ATOMIC ICEBREAKERS

V. I. Korolev, A. I. Lebedev

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

This work proposes a possible method to reduce nuclear fuel overconsumption during maneuvering by utilizing sliding steam pressure technology. It is noted that since the beginning of atomic icebreaker operations in the Arctic, there has been significant overconsumption of nuclear fuel during maneuvering of nuclear power plants, and finding solutions to reduce this is a pressing goal. A proposal is made for a temporary transition to sliding steam pressure in the main steam pipeline at the initiative of the navigator, who maneuvers the icebreaker and can control the power of the electric propulsion system. Currently, the navigator cannot independently increase the reactor power even if required for safe navigation. It is noted that all atomic icebreaker projects have limitations on the power of the electric propulsion system set by the central control post operator of the nuclear steam-generating system, and the navigator cannot independently increase reactor power for emergency maneuvers. Attention is drawn to the fact that if the navigator still sets the power of the electric propulsion system above the specified power limit, the load from the main turbogenerators is automatically removed and the previous power limit is restored. A modification is proposed where the navigator, without requesting a new increase in reactor power from the central control post, can independently increase reactor power during emergency maneuvers. This allows significantly reducing the limitation on the power of the electric propulsion system and the corresponding reactor power when performing work in the Arctic on a specific route section without compromising navigation safety. It is noted that this solution provides nuclear fuel savings and extends the active zone campaign. Evaluations performed in the research show significant nuclear fuel savings when using sliding steam pressure technology to overcome short-term unlikely obstacles arising in complex ice conditions in the Arctic.

Key words: atomic icebreakers, ice conditions, unlikely obstacles, high maneuverability, nuclear fuel overconsumption, reactor installation, separate control system, power limitation, operational reserve, load removal.

For citation:
Korolev, Vladimir I. and A. I. Lebedev "Possibility of applying sliding steam pressure technology in maneuvering nuclear power plants to reduce nuclear fuel overconsumption on atomic icebreakers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 254–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-254-270.

УДК 629.12–8:621.039

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРА ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕРАСХОДА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛАХ

В. И. Королёв, А. И. Лебедев

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

В работе предлагается возможный вариант снижения перерасхода ядерного топлива на маневрирование за счет использования технологии скользящего давления пара. Отмечается, что с начала эксплуатации атомных ледоколов в Арктике существует значительный перерасход ядерного топлива на маневрирование ядерной энергетической установкой и актуальной целью является поиск решений для его снижения. Предлагается (кратковременный переход на скользящее давление пара в главном паропроводе по инициативе судоводителя, который осуществляет маневрирование ледоколом, имея возможность управлять мощностью только гребной электрической установки. В настоящее время судоводитель самостоятельно не имеет возможности увеличивать мощность реактора даже если это требуется по условиям безопасного судовождения. Отмечается, что на всех проектах атомных ледоколов предусмотрено ограничение мощности гребной электрической установки, которое устанавливается из центрального поста управления оператором ядерной паропроизводящей установки, и судоводитель не может самостоятельно увеличить мощность реактора для экстренного маневра. Обращается внимание на то, что если судоводитель все же задает мощность гребной электрической установки больше заданного ограничения мощности, то нагрузка с главных турбогенераторов автоматически списывается и восстанавливается прежнее ограничение мощности. Предлагается модернизация, при которой судоводитель без запроса нового увеличения мощности реактора в центральный пост управления имеет возможность самостоятельно увеличить мощность реактора в период выполнения экстренного маневра. Это позволяет существенно снизить величину ограничения мощности гребной электрической установки и соответствующую мощность реакторов при выполнении работ в Арктике на конкретном участке пути без ущерба безопасности судовождения. Отмечается, что данное решение обеспечивает экономию ядерного топлива и увеличивает кампанию активной зоны. Выполненные в работе оценки показывают существенную экономию ядерного топлива при использовании технологии скользящего давления для преодоления кратковременных маловероятных препятствий, возникающих в сложных ледовых условиях Арктики.

Ключевые слова: атомные ледоколы, ледовая обстановка, маловероятные препятствия, высокая маневренность, перерасход ядерного топлива, реакторная установка, система раздельного управления, ограничение мощности, оперативный запас, списание нагрузки.

Для цитирования:
Королёв В. И. Возможность применения технологии скользящего давления пара при маневрировании ядерной энергетической установкой для снижения перерасхода ядерного топлива на атомных ледоколах / В. И. Королёв, А. И. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 254–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-254-270. — EDN QXQRIQ.

Введение (Introduction)

Условия работы атомных ледоколов во льдах Арктики при проводке крупнотоннажных судов требуют от них высокой маневренности [1]. Это в свою очередь обуславливает особенности эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) ледоколов при маневрировании [2]. При этом предпочтение отдается системе раздельного управления (СРУ), т. е. при установленной (заданной) мощности реакторной установки (РУ) многократно изменяется мощность гребных электродвигателей (ГЭД) в пределах заданной мощности РУ. Такой способ управления позволяет уменьшить количество маневров (изменений мощности) РУ за время навигации и является компромиссом между обеспечением надежности парогенераторов и активной зоны РУ и избыточным выгоранием ядерного топлива [3]. Актуальными являются поиски и использование новых перспективных атомных энергетических технологий в Арктике, позволяющих повысить эффективность использования ядерного топлива [4].

На рис. 1 приведена принципиальная схема управления ЯЭУ атомного ледокола. Задание мощности РУ осуществляет инженер-оператор из центрального поста управления (ЦПУ). При этом задатчик режимов (ЗР) на пульте управления ЯППУ (ПУ ЯППУ) устанавливается по запросу судоводителя в соответствующее положение (в процентах от номинальной мощности РУ) — $Q_{p,j}^{\text{уст}}$, и данная величина является ограничением мощности (ОМ) для гребной электрической установки (ГЭУ).

Ограничение мощности ГЭУ на j-м участке пути атомного ледокола можно представить в виде

$$N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}} = Q_{p,j}^{\text{уст}} \overline{\eta}_{\text{ЯЭУ}j}, \quad (1)$$

где $\bar{\eta}_{ЯЭУj}$ — средний КПД ЯЭУ на *j*-м участке пути ледокола;
$Q_{p,j}^{уст}$ — мощность реактора, установленная инженером-оператором на *j*-м участке.

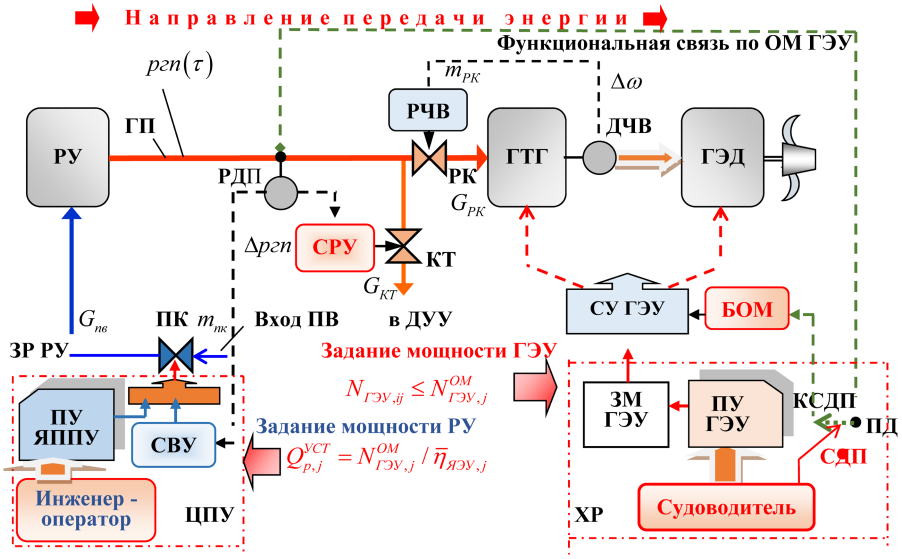

Рис. 1. Принципиальная схема управления ЯЭУ атомного ледокола:
ЦПУ — центральный пост управления; *ПУ ЯППУ* — пульт управления ядерной паропроизводящей установки; *ЗР* — задатчик режимов реакторной установки; *ХР* — ходовая рубка;
ПУ ГЭУ — пульт управления гребной электрической установки; *ЗМ ГЭУ* — задатчик мощности ГЭУ;
СУ ГЭУ — система управления ГЭУ; *БОМ* — блок ограничения мощности;
РУ — реакторная установка; *ГТГ* — главный турбогенератор; *ГЭД* — гребные электродвигатели;
ПК — питательный клапан; *РК* — регулирующий клапан; *КТ* — клапан травления;
ГП — главный паропровод; *РДП* — регулятор давления пара; *РЧВ* — регулятор частоты вращения;
ДЧВ — датчик частоты вращения; *КСДП* — ключ переключения на СДП

В дальнейшем судоводитель, оперативно задавая текущую мощность ГЭУ на *i*-м интервале пути ледокола, должен ориентироваться на ОМ ГЭУ $\left(N_{ГЭУj}^{ОМ}\right)$. Заданная инженером-оператором мощность с ПУ ЯППУ фиксируется положением ЗР (поворотный трансформатор), далее аналоговый электрический сигнал проходит несколько устройств (ДУМ, ЭГБУ) и преобразуется в гидравлический сигнал, по которому перемещается шток питательного клапана (ПК). На новых проектах для перемещения ПК используются электромеханические приводы (ЭМП), которые получают сигнал от прибора управления расходом (ПУР), функционирующего на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК), входящих в систему «Вьюга-220».

При таком режиме работы ЯЭУ на интервале времени $\Delta\tau_j = \sum_{i=1}^{N}\Delta\tau_{ij}$ создается *оперативный запас мощности РУ на маневрирование ГЭУ* без изменения установленной мощности РУ — $\Delta Q_{p,ij}^{оп}$. При этом мощность ГЭУ, заданная судоводителем на *i*-м интервале времени при прохождении *j*-го участка пути $\left(\Delta\tau_{ij}\right)$, является статистически изменяемой величиной, зависящей от способа проводки и ледовой обстановки $N_{ГЭУij}$.

Ориентируясь на внешнюю обстановку, находящийся в ходовой рубке (ХР) судоводитель задает мощность ГЭУ (на винтах) с пульта управления (ПУ ГЭУ), учитывая принятое ОМ ГЭУ. В результате воздействия судоводителя на задатчик мощности (ЗМ) ГЭУ в системе управления (СУ) ГЭУ формируются управляющие сигналы, которые изменяют напряжения в обмотках возбуждения синхронных генераторов и гребных электродвигателей. При этом изменяются токи в обмотках возбуждения гребных электродвигателей и генераторов. Частота вращения ротора ГЭД будет прямо пропорциональна напряжению на якоре ГЭД и обратно пропорциональна магнитному потоку ГЭД (см. *Королев В. И.* Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во «Медицинская пресса», 2003. — 106 с.).

При работе ЯЭУ с использованием СРУ мощность ГЭУ, заданная судоводителем в соответствии с регламентом эксплуатации, должна быть меньше или равна ОМ ГЭУ: $N_{\text{ГЭУ}ij} \le N^{\text{ОМ}}_{\text{ГЭУ}j}$.

Энергетический баланс между РУ и ГЭУ при работе в режиме СРУ устанавливается следующим образом. Обычно мощность ГЭУ меньше ОМ ГЭУ, образуется «избыточный пар», генерируемый РУ, что приводит к росту давления в главном паропроводе (ГП). Для снижения давления в ГП автоматически открывается клапан травления (КТ), и «избыточный пар» стравливается в главный конденсатор через дроссельно-увлажнительное устройство (ДУУ). Одновременно устанавливается баланс между мощностью ГЭД и главным турбогенератором (ГТГ) в соответствии со статической характеристикой регулятора частоты вращения (РЧВ). Сигнал по частоте вращения на РЧВ подается от датчика частоты вращения (ДЧВ), связанного с ротором ГТГ. В свою очередь от РЧВ подается сигнал на автоматическое перемещение штока РК. Таким образом обеспечивается энергетический баланс между ГТГ и ГЭД.

Для устойчивой работы и уверенного контроля за энергетическими балансами устанавливаются допустимые пределы изменения параметров функционирования РУ. Для контроля ЯЭУ при передаче энергии от РУ к ГЭУ и *возникающих при этом энергетических разбалансов наиболее транспарентным сигналом является давление пара в ГП.* Поэтому возникающие изменения давления пара в ГП в динамике и статике строго лимитированы. Для этого на ГП устанавливается регулятор давления пара (РДП), который поддерживает давление в паропроводе в пределах статической неравномерности характеристики регулятора. При установленном положении ПК генерируемый РУ пар, наполняющий ГП, распределяется между открытыми РК и КТ. Поддержание давления в ГП осуществляется путем перераспределения пара в ГП между главным турбоагрегатом (ГТА) и травлением избыточного пара в главный конденсатор (ГК). При этом падение давления в паропроводе увеличивается при дополнительном открытии РК (увеличении мощности ГТА) и соответствующем прикрытии КТ. Минимальное давление в ГП устанавливается при полном закрытии КТ. Это означает, что весь пар, сгенерированный в РУ при установленном положении ПК, поступил в турбину. В дальнейшем давление пара в ГП не поддерживается. При этом не учитывается почти постоянный поток пара, поступающий на вспомогательные потребители первого и второго рода пароконденсатного цикла (*В. И. Королев, И. И. Костылев, А. Ю. Ластовцев*. Особенности формирования и теплового расчета пароконденсатного цикла судов и плавучих энергоблоков с ядерной энергетической установкой: учеб. пособие. — СПб.: Бэлл, 2006. — 207 с.).

Для рассмотренной архитектуры управления ЯЭУ атомного ледокола возникает возможность минимизировать количество маневров РУ, но при этом увеличивается выгорание топлива, затраченного на единицу пройденного ледоколом пути. В истории эксплуатации атомных ледоколов известны неоднократные попытки статистического снижения «избыточной мощности» РУ на отдельных участках пути, однако в результате всегда торжествовала концепция, заданная судоводителями — важнее *безопасность мореплавания*, заключающаяся в достаточном резерве мощности РУ на преодоление непредвиденных (маловероятных) препятствий или маневров при проводке судов. Не опровергая этот постулат, предлагается искать возможность снижения оперативного запаса мощности РУ на маневрирование ГЭУ в особенностях управления ЯЭУ ледокола.

Для управления судовыми ЯЭУ также предусмотрена система взаимосвязанного управления (СВУ) — см. рис. 1. Логика работы СВУ сводится к тому, что каждый запрос по мощности ГЭУ со стороны судоводителя автоматически изменяет мощность РУ (автоматическое перемещение ПК) без травления пара через КТ (в статике). Такая технология управления не требует создание оперативного запаса мощности по РУ и не приводит к пережиганию ЯТ при маневрировании. Однако за каждым изменением судоводителем мощности ГЭУ следует изменение мощности РУ. Это создает проблему обеспечения надежности РУ и, следовательно, повышенной ядерной опасности.

На атомных ледоколах СВУ применяется крайне редко, в основном для преодоления участков с прогнозируемой структурой или свободных от льда. Такой способ управления может также применяться для исключения или минимизации травления пара в главные конденсаторы, например, ввиду *снижения шумовых эффектов от работающей ЯЭУ.*

С начала эксплуатации атомных ледоколов существуют противоречивые взгляды на выбор мощности реактора при маневрировании ЯЭУ ледокола. Служба судовождения заинтересована в выборе завышенной «избыточной» мощности реактора и соответствующего запаса на маневрирование исходя из условия безопасности судовождения и при этом отсутствия возможности самостоятельно влиять на мощность реактора. Атомно-механическая служба заинтересована в меньшем значении мощности реактора исходя из условия снижения перерасхода ядерного топлива на выполнение проводки. Таким образом, целью статьи является выработка оптимального подхода и рекомендаций при оценке текущей мощности реактора на данном участке пути для обеспечения безопасного маневрирования в изменяющихся условиях Арктики. Для решения этой задачи предлагается на коротких интервалах пути предоставить судоводителю возможность увеличивать мощность реактора за счет снижения давления ниже минимально поддерживаемого значения, т. е. перехода на технологию скользящего давление пара.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Как отмечалось ранее, судоводитель при управлении ГЭУ ориентируется на ОМ ГЭУ, в случае превышения которого вступает в действие функциональная связь между давлением в ГП и СУ ГЭУ через блок ограничения мощности (БОМ) — см. рис. 1. Завышенная нагрузка $N_{\text{ГЭУ}ij} > N^{\text{ОМ}}_{\text{ГЭУ}j}$ (заданная судоводителем текущая мощность ГЭУ превышает ОМ ГЭУ) приводит к провалу давления в ГП (ниже минимально поддерживаемого), в работу вступает БОМ, списывающий нагрузку с ГТГ до уровня ограничения мощности. При этом в течение некоторого времени давление в ГП будет ниже минимально поддерживаемого при закрытом КТ. Фактически такая ситуация приводит к снижению давления в ГП тем большему, чем больше заданная судоводителем мощность превышает ОМ ГЭУ. В практике эксплуатации работа паротурбинного оборудования при пониженном давлении в паропроводе называется *скользящим давлением пара* (СДП), при котором давление пара в паропроводе снижается меньше минимально поддерживаемого значения [5].

При управлении судовыми ЯЭУ для перехода на технологию СДП необходимо временно отключить функциональную связь между датчиком давления пара в ГП и БОМ, т. е. переключить связь с ПД на СДП (см. рис. 1) [7]. В этом случае энергетическая цепочка выглядит следующим образом. Увеличение запроса по мощности ГЭУ (на нагрузку) приводит к снижению частоты вращения ГТГ и автоматическому дополнительному открытию РК. Система автоматического управления ЯЭУ перестраивается на новую мощность ГТА (повышенную мощность ГЭД). Одновременно мощность РУ растет выше заданной инженером-оператором (по положению ПК) без запроса судоводителем нового ОМ ГЭУ (ПК не перемещался инженером-оператором). Таким образом, автоматически реализуется обратная связь между нагрузкой (суммарной мощностью ГЭД) и мощностью РУ (отрицательный температурный эффект реактивности реактора).

Данная технология управления судовой ЯЭУ *может быть использована для уменьшения задаваемой «избыточной мощности» РУ* — $\Delta Q^{\text{оп}}_{p,\,ij}$ *при маневрировании ГЭД (ГЭУ), при этом условия для безопасного мореплавания сохраняются.* Такое управление целесообразно применять *на коротких интервалах пути: при прохождении кратковременных маловероятных препятствий или во избежание столкновений при проводке судов.* Именно на такие ситуации судоводителем закладывается заведомо завышенный оперативный запас мощности по РУ, который в конечном итоге приводит к увеличенному выгоранию ЯТ [8].

Величина $\Delta Q^{\text{оп}}_{p}\left(\Delta\tau_j\right)$ в процессе эксплуатации атомных ледоколов во льдах может изменяться в широких пределах и в настоящее время определяется, как правило, интуитивно судоводителем из условия обеспечения безопасности мореплавания [2], [5]. При этом судоводитель обычно ориентируется на ОМ ГЭУ — $N^{\text{ОМ}}_{\text{ГЭУ}j}$, введенное на *j*-м участке пути (на интервале времени $\Delta\tau_j$), при котором оперативный запас мощности РУ по отношению к установленной инженером-оператором больше нуля ($\Delta Q^{\text{оп}}_{p,j} > 0$). В данном случае давление в ГП находится в допустимом диапазоне $p^{\min}_{\text{ГП}} < p_{\text{ГП}}\left(\Delta\tau_j\right) < p^{\max}_{\text{ГП}}$, а КТ — в заданных пределах перемещения. При исчерпании опера-

тивного запаса мощности на маневрирование давление в ГП снижается до минимально поддерживаемого значения $p_{\text{ГП}}\left(\Delta\tau_j\right) = p_{\text{ГП}}^{\min}$ и КТ полностью закрывается.

В случае превышения текущей мощности ГЭУ — ОМ ГЭУ ($N_{\text{ГЭУ}ij} > N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}}$) при неизменном положении ПК происходит падение давления в ГП за счет увеличения гидравлического сопротивления питающей сети из-за увеличения расхода питательной воды через питательный клапан т. е. $p_{\text{ГП}}\left(\Delta\tau_j\right) < p_{\text{ГП}}^{\min}$ при прежнем положении ПК, реализуется технология СДП в ГП. Таким образом, у судоводителя появляется возможность не запрашивать в ЦПУ новое увеличенное значение ОМ ГЭУ (с перестановкой ПК), а самостоятельно кратковременно увеличивать мощность ГЭУ сверх установленного ОМ ГЭУ для реализации требуемого маневра. При этом ключ для перехода на технологию СДП (КСДП) должен находиться в зоне управления судоводителя. Если возникшее препятствие носит систематический характер, то судоводитель по штатной схеме заказывает новое ОМ ГЭУ (увеличенное) для дальнейшего движения во льдах.

На рис. 2 представлена графоаналитическая модель выбора ограничений мощности ГЭУ при эксплуатации атомного ледокола в Арктике на *j*-м участке пути. Судоводитель, ориентируясь либо на свой опыт (интуицию) либо на известную статистическую базу, учитывающую ледовую обстановку, условия проводки и рекомендации, выработанные для этих условий, заказывает в ЦПУ величину ОМ ГЭУ ($N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}}$).

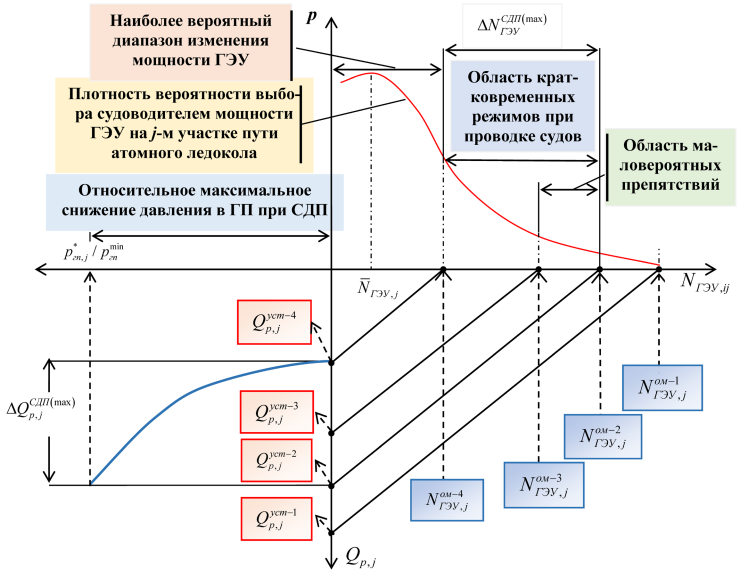

Рис. 2. Графоаналитическая модель выбора ограничений мощности ГЭУ при эксплуатации атомного ледокола в Арктике на *j*-м участке пути:
$\Delta Q_{p,j}^{\text{СДП(max)}}$ — максимальное увеличение мощности реактора при применении технологии СДП;
$\Delta N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{СДП(max)}}$ — максимальное увеличение мощности ГЭУ при применении технологии СДП (маневре судоводителя за пределом ограничения мощности); $p_{\text{ГП}j}^{*} / p_{\text{ГП}}^{\min}$ — относительное падение давления пара в главном паропроводе при применении технологии СДП

В совокупности режимов работы ГЭУ на идентифицированном *j*-м отрезке пути рассматривается текущая мощность ГЭУ — $N_{\text{ГЭУ}ij}$. Из данной совокупности выполняется выборка в соответствии со способом выполнения задачи (буксировка, лидирование, с околками, реверсы, свободное плавание в сплошных льдах). Полученные выборки необходимо дополнительно увязать с ледовой обстановкой (поля пакового льда, обломки полей, торосистость, разрушенность и т. д.) и тем самым получить реструктурированные выборки случайных чисел. Сгруппированные по рассмотренным признакам массивы чисел необходимо представить в виде эмпирических функций распределения случайной величины со своими математическими ожиданиями и дисперсией. В соответствии с теоремой Бернулли при больших выборках случайных чисел частота события приблизительно равна его вероятности. Реструктурированные выборки случайных чисел представляются в виде

гистограмм или эмпирических функций распределения. По гистограмме или эмпирической функции распределения можно представить плотность вероятностей случайной величины. Эмпирическое математическое ожидание мощности ГЭУ для реструктурированной выборки объемом *n* определяется следующим образом:

$$\bar{N}_{\text{ГЭУ}j} = \frac{N_{\text{ГЭУ }1j} + N_{\text{ГЭУ }2j} + ... + N_{\text{ГЭУ }nj}}{n}. \quad (2)$$

Эмпирическое математическое ожидание дает среднее значение исследуемой величины, вокруг которой разбросаны значения рассматриваемой величины, а дисперсия (среднеквадратическое отклонение) характеризует степень разброса значений исследуемой величины около среднего значения для данной выборки:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(N_{\text{ГЭУ}ij} - \bar{N}_{\text{ГЭУ}j}\right)^2. \quad (3)$$

Распределение мощности ГЭУ в рассматриваемой совокупности может быть описано по нормальному закону Гаусса, для которого плотность вероятности записывается в виде выражения [6]:

$$p\left(N_{\text{ГЭУ},ij}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(N_{\text{ГЭУ},ij} - \bar{N}_{\text{ГЭУ},j}\right)^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены примерные статистические характеристики условий эксплуатации при маневрировании ГЭУ, которые были приведены в отчете Мурманского филиала ЦНИИМФ. Здесь среднеквадратическое отклонение (σ_N^2) характеризует разброс мощности ГЭУ из-за *неоднородности ледовых условий и способа проводки*. При проводке буксированием σ_N^2 растет по отношению к способу проводки *лидированием* для аналогичных мощностей. В *припайных льдах* σ_N^2 = 0,136…0,185 в *дрейфующих льдах* σ_N^2 = 0,3…0,6. При этом меньшим значениям соответствует проводка судна с меньшим арктическим дедвейтом.

Таблица 1

Примерные статистические характеристики условий эксплуатации при маневрировании ГЭУ а/л типа «Таймыр» (в относительных единицах)

Способ выполнения задачи	Состояние ледового покрова	Математическое ожидание относительной мощности ГЭУ $\hat{N}_{\text{ГЭУ}}$	Среднеквадратическое относительное отклонение σ_N^2
1. Буксирование	В припайных льдах	0,65	0,136…0,185
	В дрейфующих льдах	0,55	0,3…0,6
2. Буксирование на коротком буксире	В припайных льдах	0,65	0,12…0,13
	В дрейфующих льдах	0,55	0,15…0,2
3. Работа реверсами (набегами и ударами)	–	0,5	0,22…0, 25
4. Проводка лидированием	В припайных льдах	0,6	0,12…0,13
	В дрейфующих льдах	0,55	0,15…0,2

При буксировке на коротком буксире необходимо маневрирование мощностью, обусловленное изменяющейся ледовой обстановкой. Буксировка в припайных льдах требует большой мощности ГТА (ГЭУ) при относительно незначительных отклонениях мощности. В припайных льдах математическое ожидание мощности ГЭУ составляет $\hat{N}_{\text{ГЭУ}}$ = 0,65 и среднеквадратическое отклонение σ_N^2 = 0,12…0,13. Действия судоводителя носят упреждающий характер. Частота изменения

мощности ГЭУ определяется сменой ледовой обстановки. В дрейфующих льдах наблюдается чередование *лед – вода*, *сжатие*, *разряжение*, *математическое ожидание мощности* $\hat{N}_{\text{ГЭУ}} = 0{,}55$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_N^2 = 0{,}15\ldots0{,}2$.

При работе ледокола *набегами и ударами* (частые реверсы ГЭУ) математическое ожидание мощности $\hat{N}_{\text{ГЭУ}} = 0{,}5$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_N^2 = 0{,}22\ldots0{,}25$. При этом реализуется большое количество циклов изменения мощности ГТА от номинальной мощности до мощности холостого хода (по ТУ на поставку турбоагрегатов предусмотрена возможность 30 режимов реверсирования в час).

На основе анализа длительного опыта работы на атомных ледоколах начальником службы КИП а/л «Таймыр» канд. техн. наук А. А. Адриановым были предложены коэффициенты превышения мощности РУ над необходимой текущей относительной мощностью ГЭУ — k_{ij} в зависимости от условий работы ледокола, значения которых сведены в табл. 2 [7]. Таким образом, установленная ЗР (ПК) относительная мощность РУ определяется из выражения

$$\bar{Q}_{p,j}^{\text{уст}} = \frac{N_{\text{ГЭУ},ij}}{Q_{p,0} \cdot \bar{\eta}_{\text{яЭУ},j}} k_{ij.} \tag{5}$$

На рис. 2 показана плотность вероятности выбора судоводителем текущей мощности ГЭУ на *j*-м участке пути атомного ледокола. Рассмотрены наибольшие значения выбора текущей мощности ГЭУ (правая часть статистической зависимости относительно математического ожидания текущей мощности). Наиболее вероятный диапазон изменения мощности ГЭУ рассматривается в районе математического ожидания мощности ГЭУ — $\bar{N}_{\text{ГЭУ}j}$.

Таблица 2

Рекомендации по управлению РУ атомного ледокола в зависимости от условий работы ледокола [9]

Условия работы ледокола	k_{ij}	$\partial\bar{Q}_{\text{р}} / \partial\tau$, % / с	Рекомендации по управлению
Свободное плавание по чистой воде	1	Не более 1,0	Скорость изменения мощности определяется скоростью перемещения ЗР.
Свободное плавание в разряженных льдах	1,1	Не более 1,0	Изменение мощности ГЭУ производится с ПУ с упреждением.
Свободное плавание в сплошных льдах, буксировка вплотную в реке	1,053	Не более 1,0	Судоводитель действует с упреждением.
Работа реверсами	1,4	2…3	ЗМ ГЭУ может перемещаться с полного вперед на полный назад и наоборот без выдержек времени. На чистой воде при полном ходе вперед останов винтов происходит за время не более 15 с, в швартовном режиме до 10 с.
Буксировка на морском участке на коротком буксире	1,25	Не более 1,0	Действия судоводителя носят упреждающий характер. Частота изменения мощности ГЭУ определяется сменой ледовой обстановки.
Проводка с околками	$\frac{1}{0,4 + 0,7\bar{Q}_{\text{р}}^{\text{уст}}}$	2…3	Данный режим сочетает проводку лидированием с режимом работы с реверсами.
Проводка лидированием	1,33	Не более 1,0	Необходима большая мобильность при поддержании дистанции между ледоколом и проводимым судном. Иногда необходимо быстро «отскочить» от ведомого.

Неопытный судоводитель, как правило, запрашивает заведомо завышенное ОМ ГЭУ — $N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-1}$. На *j*-м участке пути превышение текущей мощности ГЭУ $N_{\text{ГЭУ}ij}$, заданного ОМ ГЭУ $N_{\text{ГЭУ}ij} < N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-1}$, маловероятно. Опытный судоводитель обычно заказывает несколько меньшую величину ОМ ГЭУ — $N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-2}$, поэтому на *j*-м участке пути возможно выполнение неравенства $N_{\text{ГЭУ}ij} \le N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-2}$ при возникновении маловероятных препятствий. Если судоводитель ориентируется на статистически обоснованные рекомендации по реализации типовых условий проводки, то, вероятнее всего, он сможет более объективно назначать ОМ ГЭУ на *j*-м участке пути. При этом ожидается выполнение неравенства $N_{\text{ГЭУ}ij} \le N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-3}$, а превышение текущей мощности ГЭУ ограничения мощности будет иметь относительно небольшую вероятность.

В соответствии с заказанным судоводителем ОМ ГЭУ инженер-оператор в ЦПУ устанавливает мощность реактора (или реакторов) по данному запросу $\left(Q_{\text{р}j}^{\text{уст}}\right)$ на ПУ ЯППУ. По запросу неопытного судоводителя устанавливается мощность реактора $Q_{\text{р},j}^{\text{уст}-1}$ (см. рис. 2). При этом для маневрирования у судоводителя имеется оперативный запас мощности реактора $\Delta Q_{\text{р}}^{\text{оп}-1}\left(\Delta\tau_j\right)$, который почти всегда будет положительным, т. е.

$$Q_{(\text{р},j)}^{(\text{уст}-1)} - \frac{N_{\text{ГЭУ}ij}(\Delta\tau_j)}{\overline{\eta}_{\text{ЯЭУ}_j}} = \Delta Q_{\text{р}}^{\text{оп}-1}\left(\Delta\tau_j\right) > 0. \tag{6}$$

По запросу опытного судоводителя инженер-оператор на *j*-м участке пути устанавливает мощность реактора $Q_{\text{р}j}^{\text{уст}-2}$. При этом оперативный запас мощности реактора для маневрирования несколько снижается, и выполняется неравенство

$$Q_{\text{р}j}^{\text{уст}-2} - \frac{N_{\text{ГЭУ}ij}\left(\Delta\tau_j\right)}{\overline{\eta}_{\text{ЯЭУ}j}} = \Delta Q_{\text{р}}^{\text{оп}-2}\left(\Delta\tau_j\right) \ge 0 \cdot \tag{7}$$

Если учитываются научно обоснованные рекомендации по эксплуатации атомных ледоколов в различных ледовых условиях и выполнению типовых вариантов проводки, то судоводитель заказывает еще меньшую величину ОМ ГЭУ, и инженер-оператор снижает устанавливаемую мощность реактора до величины $Q_{\text{р}j}^{\text{уст}-3}$, при этом оперативный запас реактора на маневрирование также снижается, но при этом выполняется неравенство (7).

Допустим, у судоводителя имеется возможность самостоятельно влиять на мощность реактора, оперативно ее увеличивать в режиме СДП в главном паропроводе. В этом случае у судоводителя появляется определенная степень свободы, и он может еще больше снизить запрашиваемое ОМ ГЭУ — $N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-4}$, инженер-оператор при этом, соответственно, снизит установленную мощность реактора до величины $Q_{\text{р}j}^{\text{уст}-4}$, оперативный запас мощности реактора на маневрирование значительно снижается и может стать отрицательным по отношению к заданной судоводителем мощности ГЭУ:

$$Q_{\text{р}j}^{\text{уст}-4} - \frac{N_{\text{ГЭУ}ij}\left(\Delta\tau_j\right)}{\overline{\eta}_{\text{ЯЭУ}j}} = \Delta Q_{\text{р}}^{\text{оп}-4}\left(\Delta\tau_j\right) < 0. \tag{8}$$

Архитектура управления ЯЭУ при использовании технологии СДП сводится к следующему. Основную часть *j*-го пути ледокол проходит в наиболее вероятном диапазоне изменения мощности. Если появляется кратковременное маловероятное препятствие или возникают кратковременные экстренные режимы при проводке судов, требующие временного повышения мощности реактора (например, избежание столкновения при проводке лидированием), то включается *контролируемый судоводителем ресурс* на увеличение мощности реактора без запроса нового ограничения в ЦПУ.

Возможное максимальное увеличение мощности ГЭУ — $\Delta N_{\text{ГЭУ}}^{\text{СДП}_{\max}}$, определяется заданным ограничением мощности $N_{\text{ГЭУ}j}^{\text{ОМ}-4}$ и допустимым (минимальным) давлением в главном паропроводе — $p_{\text{ГП}j}^{*} / p_{\text{ГП}}^{\min}$. Допустимое снижение давления требует отдельного анализа по условиям работы включенного в пароконденсатный цикл оборудования, использующего пар из главного паропровода.

Соотношение между относительной мощностью реактора $\dfrac{Q_{\text{р}\,j}^{\text{СДП}}}{Q_{\text{р}\,j}^{\text{уст}}}$ в зависимости от относительной мощности ГЭУ $N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{СДП}} / N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}$ при применении технологии СДП на *j*-м участке пути можно записать в следующем виде:

$$\frac{Q_{pj}^{\text{СДП}}}{Q_{p,j}^{\text{уст}}}=\frac{h_{\text{ПГ}j}^{*}-h_{\text{пв}\,j}^{*}}{h_{\text{ПГ}j}-h_{\text{пв}\,j}}\frac{\dfrac{N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{СДП}}/N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}}{\eta_{0i,j}^{\text{ГТ}(*)}\cdot\eta_{\text{эл}\,j}\cdot\eta_{\text{м}}\cdot H_{a,j}^{\text{гт}(*)}}k_{\text{сн}}+\dfrac{\bar{G}_{\text{ВП}}}{N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}}}{\dfrac{1}{\eta_{0i,j}^{\text{ГТ}}\cdot\eta_{\text{эл},j}\cdot\eta_{\text{м}}\cdot H_{a,j}^{\text{гт}}}k_{\text{сн}}+\dfrac{\bar{G}_{\text{ВП}}}{N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}}}. \tag{9}$$

При этом относительное давление пара в ГП $\dfrac{p_{\text{гп},j}^{*}}{p_{\text{гп}}^{\min}}$ в зависимости от относительном мощности ГЭУ на *j*-м участке пути можно представить в виде выражения

$$\frac{p_{\text{ГП}\,j}^{*}}{p_{\text{ГП}}^{\min}}\approx 1-\frac{\Delta p_{\text{ПК}0}}{p_{\text{ГП}}^{\min}}\left[\left(\frac{\dfrac{N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{СДП}}/N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}}{\eta_{0i,j}^{\text{ГТ}(*)}\cdot\eta_{\text{эл}\,j}\cdot\eta_{\text{м}}\cdot H_{a,j}^{\text{гт}(*)}}k_{\text{с.н}}+\dfrac{\bar{G}_{\text{ВП}}}{N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}}}{\dfrac{1}{\eta_{0i,j}^{\text{ГТ}}\cdot\eta_{\text{эл}\,j}\cdot\eta_{\text{м}}\cdot H_{a,j}^{\text{ГТ}}}k_{\text{с.н}}+\dfrac{\bar{G}_{\text{ВП}}}{N_{\text{ГЭУ}\,j}^{\text{ОМ}}}}\right)^{2}-1\right], \tag{10}$$

где $k_{\text{с.н}}$ — коэффициент, учитывающий количество пара, поступающего на собственные нужды паротурбинной установки (потребители 1-го рода);

$h_{\text{ПГ}j};h_{\text{ПГ}j}^{*};h_{\text{ПВ}j};\ h_{\text{ПВ},j}^{*}$ — энтальпии пара за парогенераторами и питательной воды, поступающей в парогенераторы, соответственно, до и после маневра с СДП на *j*-м отрезке пути;

$\eta_{0i,j}^{\text{ГТ}};\eta_{0i,j}^{\text{ГТ}(*)}$ — КПД, соответственно, внутренний относительный главной турбины до и после маневра с СДП в ГП;

$\eta_{\text{эл}\,j};\eta_{\text{м}}$ — КПД электрический и механический (генератора и ГЭД) на *j*-м участке пути;

$H_{a,j}^{\text{ГТ}};\ H_{a,j}^{\text{ГТ}(*)}$ — изоэнтропийный перепад энтальпий на главной турбине, соответственно, до и после маневра с СДП на *j*-м участке пути;

$\bar{G}_{\text{ВП}}=G_{\text{ВП}}/G_{\text{ПВ}0}$ — относительное потребление пара вспомогательными потребителями (практически не зависит от режима работы ГЭД);

$\Delta p_{\text{ПК}0}$ — перепад давлений на питательном клапане (поддерживаемый астатическим регулятором);

$p_{\text{ГП}}^{\min}$ — минимальное поддерживаемое давление в главном паропроводе.

Для а/л пр. 10521 максимально возможное относительное увеличение расхода питательной воды при применении технологии СДП можно записать в следующем виде:

$$\frac{\bar{G}_{\text{ПВ1}}^{\max(*)}}{\bar{G}_{\text{ПВ1}}}=\frac{1{,}1\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}-\sqrt{2{,}1\left(\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}\right)^{2}+0{,}356\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}+0{,}83}}{-0{,}315\left(\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}\right)^{2}-0{,}12\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}-0{,}3}. \tag{11}$$

Тогда максимально возможное снижение давления по условию пропускной способности РК ГТА можно определить из выражения

$$\left(\frac{p_{\text{ГП}j}^{*}}{p_{\text{ГП}}^{\min}}\right)_{\min}\approx 1-\frac{\Delta p_{\text{ПК0}}}{p_{\text{ГП}}^{\min}}\left[\left(\frac{1{,}1\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ}\,j}}{k_{h1}}-\sqrt{2{,}1\left(\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ}j}}{k_{h1}}\right)^{2}+0{,}356\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ}j}}{k_{h1}}+0{,}83}}{-0{,}315\left(\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}\right)^{2}-0{,}12\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}-0{,}3}\right)^{2}-1\right]. \tag{12}$$

Максимальное относительное увеличение мощности реактора по условию пропускной способности РК ГТА при маневре с СДП оценивается по следующей формуле:

$$\left(\frac{Q_{\text{р}j}^{\text{СДП}}}{Q_{\text{р}\,j}^{\text{уст}}}\right)_{\max} = \frac{h^*_{\text{ПГ}\,j} - h^*_{\text{ПВ}\,j}}{h_{\text{ПГ}j} - h_{\text{ПВ}\,j}} \frac{1{,}1\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}} - \sqrt{2{,}1\left(\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}\right)^2 + 0{,}356\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ}\,1}}{k_{h1}} + 0{,}83}}{-0{,}315\left(\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}}\right)^2 - 0{,}12\dfrac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}} - 0{,}3}; \quad (13)$$

$$k_{h1} \approx \frac{1}{0{,}79}\left[0{,}104\ln\left(100\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}\right) + 0{,}31\right].$$

$k_{h1} = \dfrac{\eta_{0i1}^{\text{ГТ}} H_{a1}^{\text{ГТ}}}{\eta_{0i0}^{\text{ГТ}} H_{a0}^{\text{ГТ}}}$ — коэффициент, учитывающий изменение изоэнтропийного перепада энтальпий и внутреннего относительного КПД главных турбин на частичных режимах. Как правило, этот коэффициент меньше единицы.

На рис. 3 показана оценка изменения параметров функционирования при применении технологии СДП на атомных ледоколах пр. 10521. Чем меньше величина ОМ ГЭУ (установленная мощность РУ), тем большим может быть увеличение расхода питательной воды и мощности реактора при переходе на технологию СДП в ГП. При этом будет наблюдаться и большее снижение давления в ГП. Наиболее критичны к снижению давления в ГП являются пароструйные эжекторы в пароконденсатном цикле (главные и вспомогательные). Одновременно к пароструйным эжекторам подводится пар из вспомогательной паровой магистрали при рабочем давлении 1,6 МПа, что составляет примерно $\dfrac{p^*_{\text{ГП}\,j}}{p^{\min}_{\text{ГП}}} \approx$ 0,6 относительного снижения давления в ГП. Таким образом, без срыва пароструйных эжекторов можно увеличить мощность РУ почти в 2 раза относительно установленного ОМ ГЭУ. Чем выше установленное ОМ ГЭУ (установленная мощность реактора), тем меньше может быть предполагаемое увеличение мощности при переходе на технологию СДП в ГП.

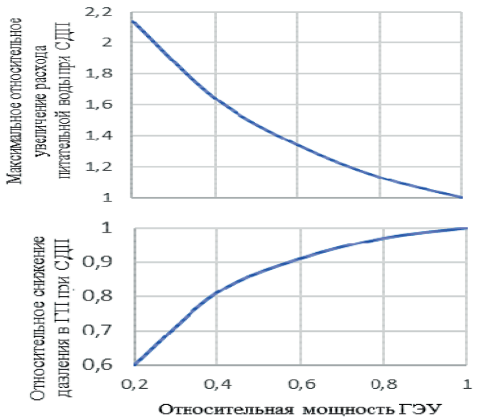

Рис. 3. Изменение параметров функционирования при применении технологии СДП на атомных ледоколах пр. 10521

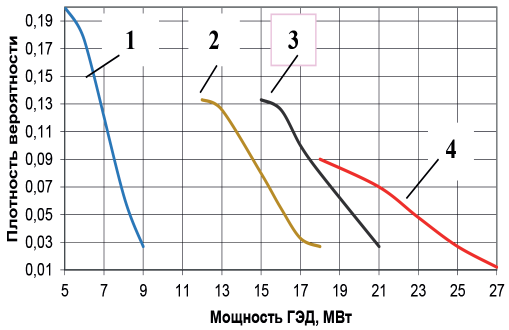

Рис. 4. Вероятное распределение мощности ГЭД при различных способах проводки ледокола: *1* — свободное плавание по чистой воде и в разряженных льдах; *2* — буксирование в дрейфующих льдах; *3* — буксирование в припайных льдах; *4* — проводка лидированием

На рис. 4 в качестве примера представлены вероятные распределения мощности ГЭД при различных способах проводки судов атомным ледоколом. В данном случае по величине математического ожидания мощности ГЭУ и дисперсии наиболее жестким режимом принята *проводка лидированием,* так как необходима высокая мобильность при поддержании дистанции между ледоколом и проводимым судном, а также необходим запас мощности для быстрого ухода от ведомого судна.

Результаты (Results)

На рис. 5 показана блок-схема организации управления ЯЭУ атомного ледокола с возможностью перехода на скользящее давление пара в ГП. Ориентируясь на ледовую обстановку, судоводитель из ХР при помощи машинного телеграфа ЦПУ подает команду (задание) в ЦПУ на требуемую мощность РУ *1* и инженер-оператор на пульте управления ЯППУ устанавливает ЗР в запрашиваемое положение *2*).

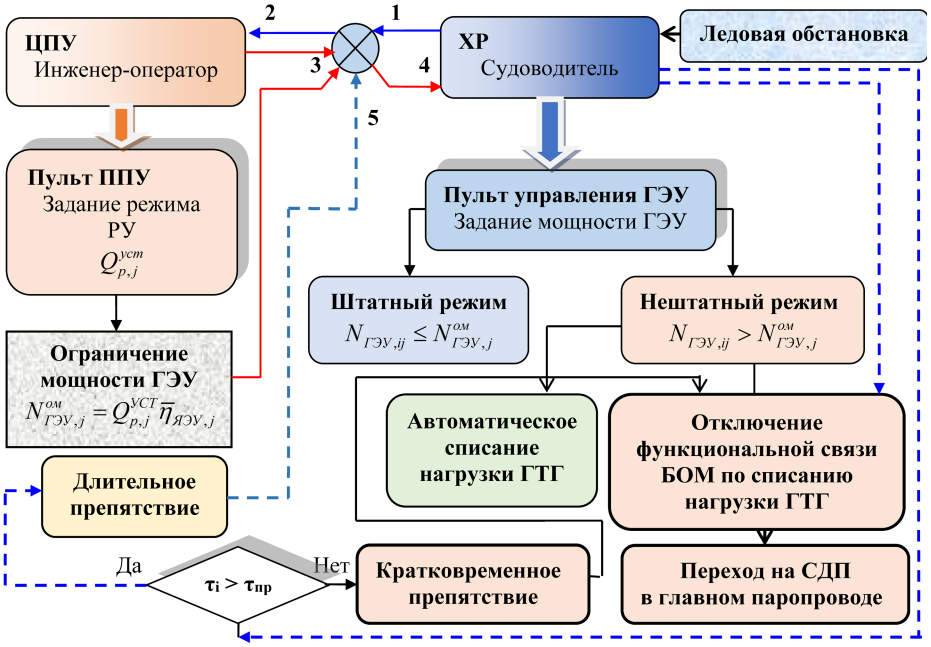

Рис. 5. Блок-схема управления ЯЭУ атомного ледокола с возможностью перехода к технологии СДП в ГП

Если в процессе управления ледоколом задаваемая судоводителем с пульта управления ГЭУ мощность превысит ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУ\,ij} > N^{ОМ}_{ГЭУ\,j}$, то возникает нештатный режим и в этом случае предусмотрена система, обеспечивающая автоматическое списание нагрузки с ГТГ, т. е. автоматическое снижение запрашиваемой мощности на ГЭУ. Чтобы этого не произошло, судоводителю следует временно прервать функциональную связь по списанию нагрузки ГТГ. Таким образом, у него появляется дополнительная возможность на некоторых коротких участках пути оперативно форсировать мощность ГЭД, не запрашивая новое ОМ ГЭУ, задаваемое из ЦПУ.

Такая технология управления позволяет при соблюдении безопасности судовождения *снизить величину устанавливаемой мощности реакторов и, соответственно, уменьшить выжигание ядерного топлива* при выполнении ледоколом определенного объема работ в Арктике. Переход на технологию СДП должен быть зафиксирован в ЦПУ инженером-оператором с помощью сигнализации (*3*). При этом вахта в ЦПУ усиливает оперативный контроль за параметрами функционирования ЯЭУ (*4*).

Если длительность прохождения ледоколом препятствий возрастает (длительное препятствие), то судоводитель по штатной связи *5* (см. рис. 5) запрашивает в ЦПУ новый (повышенный) уровень мощности РУ и, следовательно, новое ОМ ГЭУ. Ориентиром при этом может служить превышение длительности прохождения препятствия некоторой предельной величины $\tau_i > \tau_{пр.}$ Предельная длительность прохождения препятствия ($\tau_{пр}$) определяется непосредственно судоводителем.

Обсуждение (Discussion)

Оценки экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проводке судов в Арктике показали, что предложенная технология (способ) управления ЯЭУ позволяет значительно уменьшить выгорание ядерного топлива в активной зоне при выполнении заданного объема работ в Арктике [8]. На рис. 6 предложена упрощенная модель использования расчетного энергозапаса активной зоны РУ при выполнении типовых работ атомным ледоколом в Арктике, а на рис. 6, *а* представлены варианты выбора судоводителем установленной мощности реактора при выполнении работ. В качестве примера для описания типовых работ в данном случае использованы данные, приведенные на рис. 4. Запрашиваемые (установленные) мощности РУ для преодоления типовых препятствий значительно отличаются в зависимости от квалификации судоводителей, наличия статистических данных по прохождению типовых препятствий и возможности применения технологии СДП. При этом наибольшую мощность реактора для выполнения типовых работ заказывает неопытный судоводитель. Однако невысокую мощность реактора может назначить даже неопытный судоводитель при наличии у него возможности на коротких интервалах времени оперативно увеличивать мощность ГЭУ (ГЭД) за счет перехода на технологию СДП в ГП. При этом вахта в ЦПУ должна быть осведомлена о переходе на СДП и тщательно контролировать параметры функционирования РУ и ПТУ на данном отрезке времени.

На рис. 6, *б* оценена возможная энерговыработка активной зоны при выполнении текущих работ атомным ледоколом в Арктике при различных вариантах судовождения. При этом в качестве примера используется статистическая информация по эксплуатации а/л «Таймыр» (*Королев В. И.* Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во «Медицинская пресса», 2003. —106 с.). Наиболее энергозатратным (по времени использования) видом проводки принято буксирование в дрейфующих льдах. При этом наибольшее выгорание ядерного топлива обеспечивает неопытный судоводитель. Однако с применением судоводителем технологии СДП в ГП энерговыработка по всем видам проводки резко сокращается.

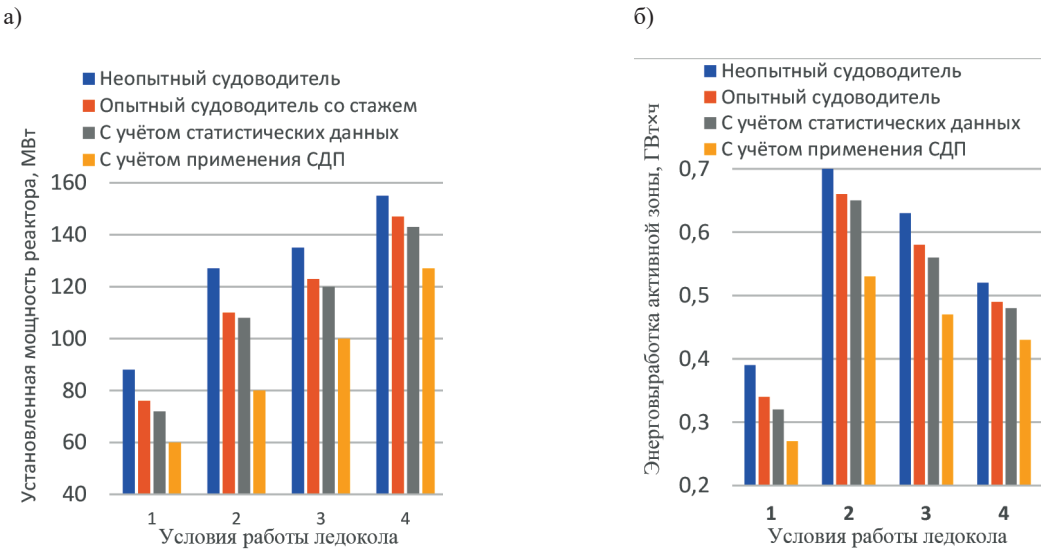

Рис. 6. Упрощенная модель использования расчетного энергозапаса активной зоны РУ при выполнении типовых работ атомным ледоколом в Арктике:
а — варианты выбора судоводителем установленной мощности реактора;
б — возможная энерговыработка активной зоны при выполнении текущих работ (*1* — свободное плавание во льдах; *2* — буксирование в дрейфующих льдах; 3 — буксирование в припайных льдах; *4* — проводка лидированием)

На рис. 7 представлены результаты расчетов эффективности использования расчетного энергозапаса при различных вариантах назначения ОМ ГЭУ, а на рис. 7, *а* приведена энерговыра-

ботка активной зоны с учетом вариантов назначения ОМ ГЭУ. Если судовождение осуществляется неопытным судоводителем, то при выполнении заданного объема работ в Арктике расчетный энергозапас активной зоны (кампания активной зоны) заканчивается к некоторому условному моменту времени и требуется перегрузка топлива (активной зоны). Одновременно при работе более опытного судоводителя к данному условному моменту времени остается некоторый остаточный энергозапас, который может быть в дальнейшем полезно использован для дополнительной проводки судов. При использовании технологии СДП в ГП остаток энергозапаса составляет значительную часть общего расчетного энергозапаса — 26 %. Этот остаток энергозапаса может быть полезно использован на атомном ледоколе для выполнения еще большего объема дополнительных работ. Данное значение можно сопоставить с работой РУ без травления пара из главного паропровода, т. е. без создания запаса мощности РУ на маневрирование. Такой режим работы возможен при использовании СВУ РУ и ПТУ (см. рис. 1). По сравнению с использование СРУ и управлении ледоколом неопытным судоводителем экономия топлива при применении СВУ при прочих равных условиях может составить примерно 33 % расчетного энергозапаса.

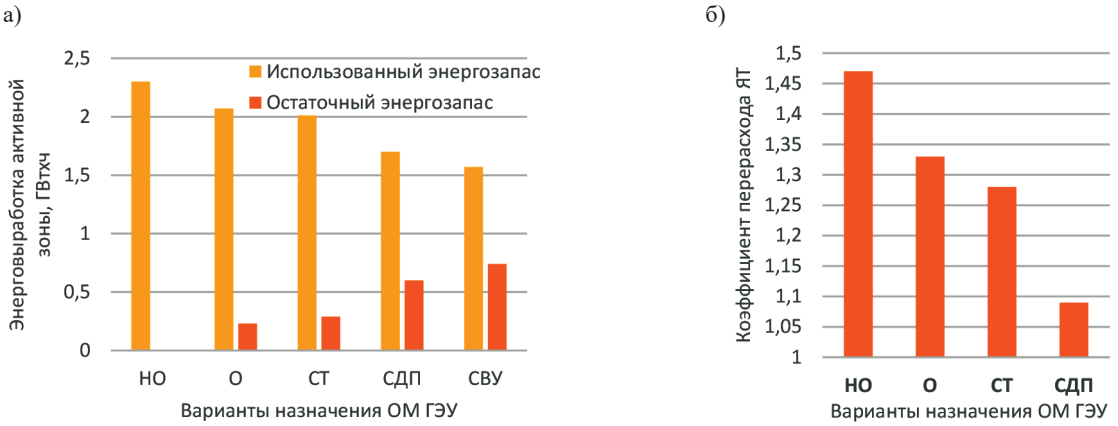

Рис. 7. Эффективность использования расчетного энергозапаса при различных вариантах назначения ОМ ГЭУ:
а — энерговыработка активной зоны с учетом варианта назначения ОМ ГЭУ;
б — коэффициент перерасхода ядерного топлива при различных вариантах назначения ОМ ГЭУ
(*НО* — неопытный судоводитель; *О* — опытный судоводитель;
СТ — с учетом статистических данных по типовой эксплуатации;
СДП — с учетом применения технологии СДП;
СВУ — использование системы взаимосвязанного управления (без травления пара))

В публикации [9] разработаны критерии оценки эффективности работы ледоколов по экономии ядерного топлива. При этом для ее оценки вводятся коэффициенты использования и перерасхода ядерного топлива на маневрирование ГЭУ. На рис. 7, *б* показано изменение коэффициента перерасхода ядерного топлива на маневрирование ГЭУ (ледокола) при различных вариантах судовождения. Коэффициент перерасхода ядерного топлива на маневрирование при управлении ледоколом неопытным судоводителем для рассмотренной модели эксплуатации составляет 1,47. Данное значение уменьшается до 1,33 при управлении ледоколом опытным судоводителем и снижается до 1,09 при судовождении с использованием технологии СДП в ГП.

Заключение (Conclusion)

Технология СДП для улучшения технико-экономических показателей энергоблоков на переменных режимах широко разработана и внедрена в стационарной энергетике. При этом рассматриваются энергоблоки на органическом и ядерном топливе. Технология СДП в ГП может быть успешно использована на атомных ледоколах для уменьшения выгорания ядерного топлива при работе во льдах. Однако ее применение на атомных ледоколах носит иной характер, связанный со спецификой работы ЯЭУ атомных ледоколов при проводке судов в Арктике.

Для обеспечения надежности РУ при частом изменении мощности ГЭУ используется система раздельного управления между РУ и ПТУ, которая определяет свои правила эксплуатации судовой ЯЭУ. При этом создается оперативный запас мощности РУ на маневрирование ГЭУ, т. е. мощность реактора заведомо завышается по отношению к необходимой для прохождения данного участка пути в Арктике. В пределах заданной мощности реактора судоводитель может осуществлять маневры ГЭУ. Пределом для него является ОМ ГЭУ, поскольку в данном случае поддерживается давление в ГП. Величина оперативного запаса субъективно определяется судоводителем, управляющим ГЭУ. При назначении ОМ ГЭУ судоводитель закладывает заведомо завышенный оперативный запас на маневрирование ГЭУ, рассчитывая его использовать в экстренных случаях, имеющих маловероятный характер. Для снижения оперативного запаса мощности РУ, а, следовательно, установленной мощности реактора предлагается маневрирование ГЭУ за пределами ОМ и переход на СДП в ГП. Это позволяет судоводителю осуществлять навигацию во льдах с пониженным по отношению к традиционным режимам работы РУ оперативным запасом мощности на маневрирование, поскольку ему временно передается управление мощностью реактора. Перестройка системы управления расходом питательной воды при неизменном положении питательного клапана и работе ГЭУ за пределом ограничения мощности рассмотрена в работе [10].

Применение технология СДП в ГП при маневрировании за пределом ОМ ГЭУ позволяет при прочих равных условиях увеличить длительность кампании и повысить эффективность использования ядерного топлива активной зоны. Расчеты показали, что применение СДП в ГП по инициативе судоводителя для маневрирования ГЭУ при принятой модели использования расчетного энергозапаса позволяет увеличить длительность кампании примерно на 27…30 %, что лишь незначительно уступает увеличению длительности кампании, которая может быть при использовании для управления ЯЭУ СВУ. При этом большая часть пути в Арктике будет проходить при СРУ, что не отразится на надежности РУ. Для сопоставления эффективности работы атомных ледоколов при проводке судов в Арктике в части использования ядерного топлива целесообразно применять коэффициент перерасхода топлива, используемый в работе [9]. Если на ледоколе применяется технология СДП в ГП, то коэффициент перерасхода топлива может быть снижен с 1,47 при традиционных способах проводки до 1,09, что, безусловно, свидетельствует о более эффективной работе эксплуатационного персонала атомного ледокола. Это дает существенную экономию ядерного топлива и повышает экономические показатели атомных ледоколов. Следует отметить, что выполненные расчеты требуют уточнения на действующих атомных ледоколах или подтверждения с использованием математических моделей ЯЭУ, заложенных в полномасштабные тренажеры соответствующих проектов атомных ледоколов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655. — EDN RMHDVO.

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

3. *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. — EDN RSMWQG.

4. *Саркисов А. А.* Перспективы использования атомных энергетических технологий в Арктике / А. А. Саркисов, Д. О. Смоленцев, С. В. Антипов [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12. — № 3. — С. 349–358. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-349-358. — EDN CENAAX.

5. *Королев В. И.* Применение скользящего давления пара в главном паропроводе атомного ледокола для уменьшения выгорания ядерного топлива / В. И. Королев, А. С. Лисина // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. —С. 103–109.

6. *Королев В.* И. Статистические модели режимов работы ГЭУ и РУ атомного ледокола при эксплуатации в Арктике / В. И. Королев, А. С. Лисина // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, 10 сентября — 20 октября 2018 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 100–103.

7. Повышение эффективности использования ядерного топлива судовых активных зон за счет применения различных технологий управления мощностью РУ [Текст]: отчет о НИОКР № 214092350007 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»; руковод. А. Ю. Ластовцев. — СПб., 2014. — 52 с.

8. *Королев В. И.* Повышение экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проводке судов в Арктике / В. И. Королев // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 2. — С. 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253. — EDN KHYVIO.

9. *Королев В. И.* В. И. Маневренность и экономичность ядерных энергетических установок атомных ледоколов / В. И. Королев, А. Ю. Ластовцев // Материалы научно-практическая конференция, посвященная 150-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. — СПб.: СПбГМТУ, 2013. — С. 150–153.

10. *Королев В. И.* Использование скользящего давления пара в главном паропроводе для повышения экономических показателей энергетической установки атомных ледоколов / В. И. Королев, А. И. Лебедев // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2025. № 1. — С. 70–80. — EDN XWYUFG.

REFERENCES

1. Dobrodeev, A. A. and K. E. Sazonov. “Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

2. Korolev, V. I. “Features of maneuverable operation modes of nuclear icebreakers reactor installations when working in the arctic.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125.

3. Zverev, D. L., Yu. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, et al. “Reaktornye ustanovki dlya atomnykh ledokolov. Opyt sozdaniya i sovremennoe sostoyanie.” *Atomnaya energiya* 129.1 (2020): 29–37.

4. Sarkisov, A. A., D. O. Smolentsev, S. V. Antipov, et al. “Prospects of using nuclear power technologies in the arctic.” *Arctic: Ecology And Economy* 12.3 (2022): 349–358. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-349-358.

5. Korolev, V. I. and A. S. Lisina. “Primenenie skol’zyaschego davleniya para v glavnom paroprovode atomnogo ledokola dlya umen’sheniya vygoraniya yadernogo topliva.” *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 31 marta 2015 goda. Tom 2*. Sankt-Peterburg: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2015: 103–109.

6. Korolev, V. I. and A. S. Lisina. “I. Statisticheskie modeli rezhimov raboty GEU i RU atomnogo ledokola pri ekspluatatsii v Arktike.” *Sbornik tezisov dokladov natsional’noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava FGBOU VO “GUMRF imeni admirala S. O. Makarova”, Sankt-Peterburg, 10 sentyabrya — 20 oktyabrya 2018 goda.* Sankt-Peterburg: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2018: 100–103.

7. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping: R&D report “Povyshenie effektivnosti ispol’zovaniya yadernogo topliva sudovyh aktivnyh zon za schet primeneniya razlichnyh tekhnologij upravleniya moshchnoj RU” No. 214092350007. Saint-Petersburg, 2014.

8. Korolev V. I. Improving the economic performance of nuclear icebreakers when sailing ships in the Arctic / V. I. Korolev // Arctic: Ecology and Economics. — 2021. — Vol. 11. — No. 2. — PP. 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253. — EDN KHYVIO.

9. Korolev V. I. Maneuverability and efficiency of nuclear power plants of nuclear icebreakers / V. I. Korolev, A. Y. Lastovtsev // Proceedings of the scientific and practical conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician A. N. Krylov. — St. Petersburg: SPb.GMTU, 2013. Pp. 150–153.

10. Korolev V. I., Lebedev A. I. The use of sliding steam pressure in the main steam pipeline to increase the economic performance of the nuclear icebreaker power plant// Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. 2025. No. 1. — Pp. 70–80 EDN XWYUFG.

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*
Лебедев Анатолий Иванович —
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *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*
Lebedev, Anatoly I. —
PhD, Assistant Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping 5/7
Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf _snef@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.
Received: Feb. 20, 2025