

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ ПРИ ПРОВОДКЕ СУДОВ В АРКТИКЕ

В. И. Королёв

ФГБОУ ВО Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2020 г.

Наиболее дорогой заменяемой частью атомных ледоколов является активная зона реактора, поэтому увеличению ее энергозапаса и энергоресурса придавалось большое значение. На первом этапе развития активных зон удалось решить задачу выравнивания расчетного энергозапаса и назначенного энергоресурса. Другой проблемой, связанной с маневрированием ледоколов в Арктике, является назначение судоводителем необоснованно завышенного ограничения мощности гребной электрической установки, приводящее к уменьшению длительности кампании активной зоны и преждевременной выгрузки ее из реактора. Предлагаются решения, позволяющие увеличить длительность кампании активной зоны в условиях маневрирования ледокола в Арктике.

Ключевые слова: ограничение мощности, гребная электрическая установка, маневрирование, задатчик режимов, мощность реактора, безопасность судовождения, главный паропровод, скользящее давление пара, травление пара, маневр за пределом ограничения мощности, регламент проводки, эмпирическое математическое ожидание, эмпирическая дисперсия, ядерное топливо, коэффициент использования ядерного топлива.

Введение

Освоение арктических территорий России играет важнейшую роль в обеспечении национальной безопасности государства и наращивании его экономического потенциала. В настоящее время Россия располагает самым крупным по численности ледокольным флотом. В его состав входит около 40 судов различных классов и назначений. К тому же Россия — единственная страна, имеющая ледоколы с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) [1].

На всех этапах развития атомного ледокольного флота ставилась задача снижения топливной составляющей эксплуатационных расходов и увеличения продолжительности работы на одной загрузке реактора ядерным топливом (ЯТ), а также внедрения более экономичных режимов эксплуатации ЯЭУ [2].

Одной из основных проблем эксплуатации атомных ледоколов в Арктике является рациональное назначение ограничения мощности (ОМ) гребной электрической установки (ГЭУ) при маневрировании в различных условиях проводки судов атомным ледоколом. Назначенное ОМ ГЭУ в конкретный мо-

мент времени по условиям эксплуатации ЯЭУ должно быть больше возможных ситуативных мощностей, задаваемых судоводителем на данном участке пути во льдах, — $N_{гэу}^{ом} \geq N_{гэу}(\tau_j)$. Для выполнения этого условия инженер-оператор, находящийся в центральном посту управления (ЦПУ), при помощи задатчика режимов (ЗР) устанавливает соответствующую тепловую мощность реактора (реакторной установки) — $Q_p^{уст} = N_{гэу}^{ом} / \eta_{яэу}$. Данная мощность реактора сохраняется на протяжении всего последующего пути до тех пор, пока судоводитель не прикажет другое ОМ ГЭУ.

Существующая в настоящее время тенденция назначения ОМ ГЭУ в основном определяется судоводителями исходя из неоспоримого основания — безопасности судовождения. При этом безопасность судовождения судоводитель рассматривает с точки зрения назначения избыточной мощности реактора (про запас), полагаясь на свои интуицию и опыт. При более глубоком изучении проблемы можно сохранить безопасность судовождения и при этом снизить «назначаемую» избыточную мощность реактора, а следовательно, уменьшить выгорание ядерного топлива на единицу пути, т. е. повысить экономические пока-

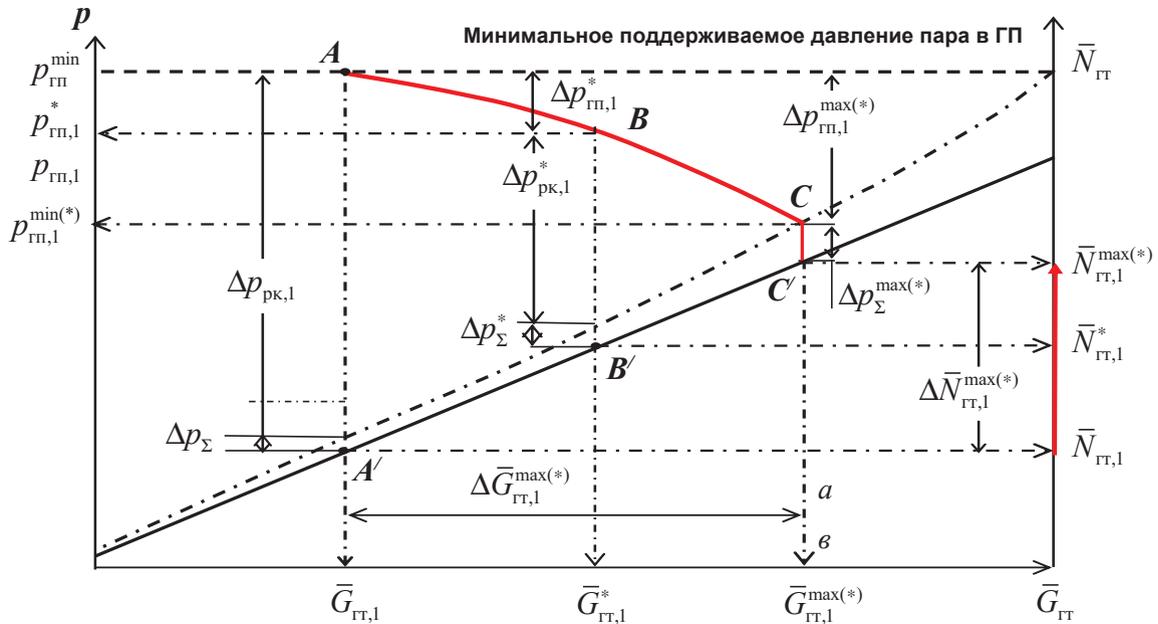


Рис. 1. Схема работы главных турбин (главных турбогенераторов) при использовании маневра за пределами ОМ и переходе на режим кратковременного скользящего давления пара в главном паропроводе
 Fig. 1. Operation scheme of the main turbines (main turbine generators) when using a maneuver outside the PL (Power Limitation) and switching to the mode of short-term sliding steam pressure in the main steam line

затели эксплуатации атомного ледокола. Кроме того, уменьшатся тепловые выбросы ледокола в окружающую среду. Следует установить минимально допустимую (всесторонне обоснованную) избыточную мощность реактора, при которой соблюдается необходимая безопасность судоходства.

Методы и материалы

В работе [3] рассмотрены возможные варианты назначения ограничений мощности ГЭУ исходя из различных оснований. При этом *наибольшая избыточная мощность* (величина ОМ), как правило, интуитивно назначается неопытным судоводителем, что компенсирует его опасения относительно безопасности проводки. Если ограничение определяется опытными судоводителями со стажем и при этом учитываются мнения специалистов атомно-механической службы (АМС), то избыточная мощность обычно снижается. Обоснованное снижение назначаемой избыточной мощности ГЭУ возможно при использовании результатов анализа статистических данных о работе ГЭУ в типовых условиях эксплуатации атомных ледоколов в Арктике с учетом вероятного рассеивания мощности ГЭУ — $\Delta N_{\text{ГЭУ}}^{\text{рас}}$. При этом на основании изучения режимов проводки и идентификации специфических условий следует сформировать *типовую базу фиксированных регламентов проводки* R_p , учитывающих как состояние ледового покрова, так и выбранного способа проводки [4]. В данном вопросе необходима *осознанная поддержка судоводителей*.

Значительного снижения назначаемой избыточной мощности реактора можно ожидать при пере-

ходе на технологию кратковременного маневрирования ГЭУ за пределами ОМ (превышении) со скользящим давлением пара в главном паропроводе и снятой функциональной связью по ОМ. Именно эта связь не позволяет судоводителю задавать мощность ГЭУ, превышающую установленное ОМ. При этом основным сопутствующим эффектом является снижение давления пара в главном паропроводе, ниже минимально поддерживаемого значения системой автоматики ЯЭУ. Данный вопрос рассматривался в [3; 4]. Существует успешный опыт применения скользящего давления пара на АЭС. Данная информация представлена в ряде публикаций специалистов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [5; 6].

На рис. 1 приведена схема работы главных турбин (главных турбогенераторов) при использовании маневра за пределами ОМ и переходе на режим кратковременного скользящего давления пара в главном паропроводе (ГП). Данный режим реализуется после полного закрытия клапана травления (КТ) в системе парораспределения главной турбины и снижении давления в ГП до минимально поддерживаемого в автоматическом режиме — $p_{\text{ГП}}^{\text{min}}$. Допустим, в начале маневра из этого состояния относительный расход пара в главные турбины составлял $\bar{G}_{\text{ГТ},1}$, что соответствовало относительной мощности турбины $\bar{N}_{\text{ГТ},1}$. Если из этого состояния судоводитель задал мощность ГЭУ, превышающую ОМ при снятой функциональной связи по ОМ, то из-за увеличения нагрузки на главную турбину частота ее вращения снизится, что приведет к автоматическому дополнительному открытию регулирующего кла-

пана (РК) в системе парораспределения турбины, и дросселирование в клапане изменится от значения $\Delta p_{рк,1}$ до $\Delta p_{рк,1}^*$ — процесс ВВ'. При этом расход пара в ГТ увеличится до величины $\bar{G}_{гт,1}^*$, и этому расходу пара будет соответствовать относительная мощность турбины $\bar{N}_{гт,1}^*$. Давление пара в ГП одновременно снизится на величину $\Delta p_{гп,1}^*$ — процесс АВ. Мощность реактора в данном случае увеличится за счет саморегулирования до значения, соответствующего новой нагрузке ГЭУ $Q_{р,1}^* = \bar{N}_{гт,1}^* / \eta_{яэу}$ без изменения положения питающего клапана (т. е. ЗР), и станет выше предварительно установленной — $Q_{р,1}^* \geq Q_{р,1}^{уст}$.

Наибольшего эффекта относительного увеличения мощности главной турбины $\bar{N}_{гт,1}^{max(*)}$ можно ожидать при полном открытии РК главной турбины — процесс АС. В этом случае давление пара в ГП снизится на величину $\Delta p_{гп,1}^{max(*)}$, дросселирование в подводящих паропроводах, БЗК и полностью открытым РК составит $\Delta p_{\Sigma}^{max(*)}$ — процесс СС'. Выполненный маневр приведет к возрастанию расхода пара в главную турбину на величину $\Delta \bar{G}_{гт,1}^{max(*)}$ и соответствующей относительной мощности главной турбины на величину $\Delta \bar{N}_{гт,1}^{max(*)}$ при неизменном положении ЗР реактора.

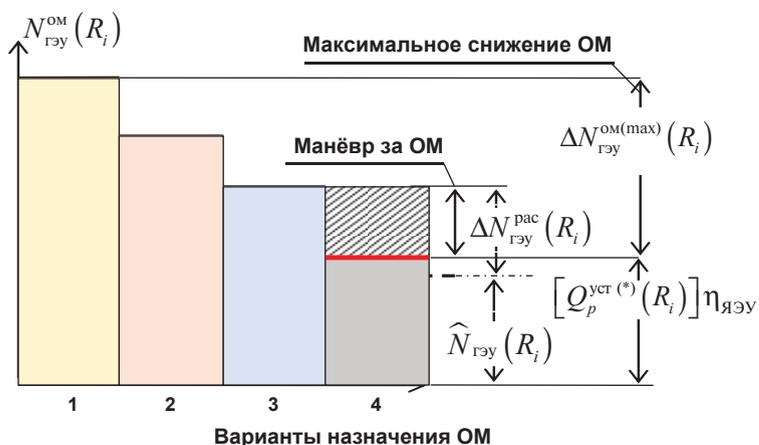


Рис. 2. Схема вариантов назначения ОМ ГЭУ при маневрировании на j -м интервале времени работы ледокола: 1 — интуитивно назначается неопытным судоводителем ($N_{гэу}^{ом(1)}$), 2 — назначается опытным судоводителем со стажем ($N_{гэу}^{ом(2)}$), 3 — назначается с учетом анализа статистических данных по эксплуатации ГЭУ для идентифицированного регламента проводки R_i из типовой базы фиксированных регламентов проводки ($N_{гэу}^{ом(3)}$), 4 — при использовании технологии кратковременного маневрирования ГЭУ за пределом ОМ со скользящим давлением пара в главном паропроводе ($N_{гэу}^{ом(4)}$)

Fig. 2. Diagram of options for power limitation of the electric propulsion installation (PL EPI) when maneuvering at the j -th time interval of the icebreaker operation: 1 — intuitively set by an inexperienced navigator ($N_{гэу}^{ом(1)}$), 2 — set by an experienced navigator ($N_{гэу}^{ом(2)}$), 3 — set taking into account the analysis of statistical data on the operation of the electric propulsion installation (EPI) for the identified navigation regulations R_i from the standard base of fixed navigation regulations ($N_{гэу}^{ом(3)}$), 4 — set when using the technology of short-term maneuvering of the EPI beyond the PL with sliding steam pressure in the main steam line ($N_{гэу}^{ом(4)}$)

На рис. 2 представлена схема возможных вариантов назначения ОМ ГЭУ при маневрировании на j -м интервале времени работы ледокола, а на рис. 3 — модель текущих изменений мощностей ГЭУ атомного ледокола при постоянной мощности реактора на j -м интервале времени.

Средняя мощность ГЭУ (ГТГ) на интервале времени τ_j при постоянной заданной мощности реактора $Q_{р,j}^{уст}$ составляет $\hat{N}_{гэу}(R_i) < Q_{р,j}^{уст} \eta_{яэу}$.

Мощность реактора в течение j -го контрольного периода времени используется (рис. 3):

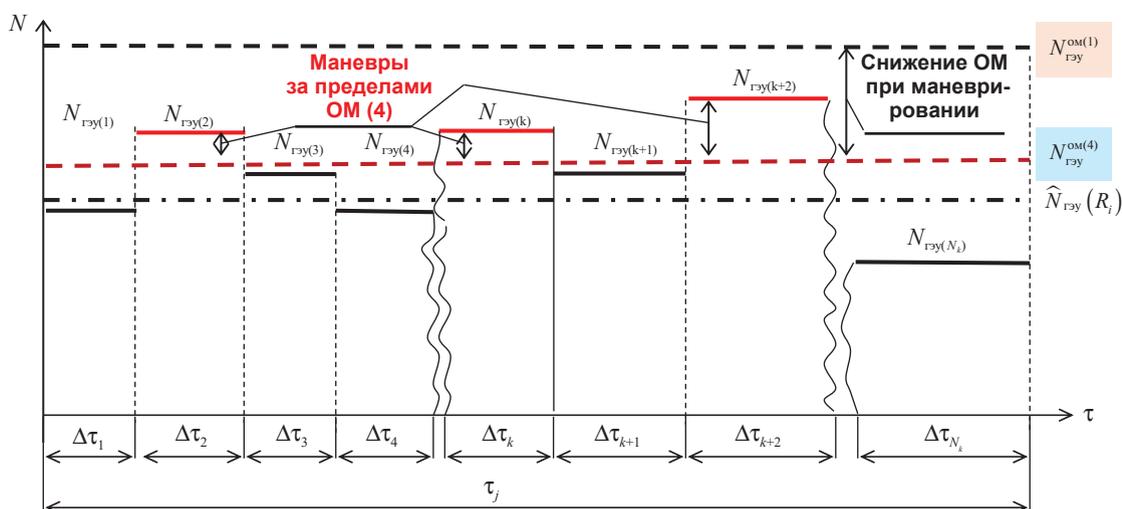


Рис. 3. Модель текущих изменений мощностей ГЭУ атомного ледокола при постоянной мощности реактора на j -м интервале времени
Fig. 3. Model of the current changes in the power of the EPI of a nuclear icebreaker at a constant reactor power at the j -th time interval

- на генерацию электроэнергии ГТГ при мощности ГЭУ соответственно $N_{гэу(1)}, N_{гэу(2)}, N_{гэу(3)}, N_{гэу(4)}, \dots, N_{гэу(k)}, N_{гэу(k+1)}, N_{гэу(k+2)}, \dots, N_{гэу(N_k)}$ и обеспечение движения ледокола на интервалах времени $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3, \Delta\tau_4, \dots, \Delta\tau_k, \Delta\tau_{k+1}, \Delta\tau_{k+2}, \dots, \Delta\tau_{N_k}$ при постоянном положении ЗР реактора (установленной мощности реактора) — $Q_{p,j}^{уст} = N_{гэу}^{ом} / \eta_{язу}$;
- на травление пара в главный конденсатор для обеспечения резерва мощности реактора (оперативного запаса) на маневрирование атомного ледокола (заказывается судоводителем), при этом избыточная мощность реактора на k -м интервале времени $\Delta\tau_k$ составляет

$$\Delta Q_{p,k}^{тр}(\Delta\tau_k) = \frac{N_{гэу}^{ом}(\tau_j)}{\eta_{язу}} - \frac{N_{гэу}(\Delta\tau_k)}{\eta'_{язу}};$$

- на вспомогательные потребители первого $Q_{p,ij}^{БП-I}$ и второго $Q_{p,ij}^{БП-II}$ рода при движении ледокола [7];
- на добавку свежего пара в деаэратор для обеспечения теплового баланса $Q_{p,ij}^{доб}$ на k -м интервале времени;
- на потребители пара во время стоянки ледокола с работающим реактором $Q_{p,ij}^{ст}$.

Результаты

С учетом сказанного минимальное обоснованное ОМ ГЭУ для регламента проводки R_i можно выразить соотношением

$$\bar{N}_{гэу}^{ом}(R_i) = \frac{1}{a_1(\bar{G}_{пв}^{ом})} [\hat{N}_{гэу}(R_i) + \Delta N_{гэд}^{рас}(R_i)], \quad (1)$$

$$\bar{G}_{пв}^{ом} = (1 - \bar{G}_{вп}) \frac{\bar{N}_{гэу}^{ом}}{k_h^{ом}}(R_i) + \bar{G}_{вп}, \quad (2)$$

где $\hat{N}_{гэу}(R_i)$ — эмпирическое математическое ожидание относительной мощности ГЭУ из базы типовых фиксированных регламентов проводки R_i ;

$\frac{N_{гт,1}^*}{N_{гт,1}} \approx \frac{N_{гэу,1}^*}{N_{гэу,1}} = a_1(\bar{G}_{пв}^{ом})$ — коэффициент снижения

мощности ГЭУ за счет маневра за пределами ограничения мощности ГЭУ; $\bar{G}_{пв}^{ом} = \bar{G}_{пв,1}$ — расход питательной воды, соответствующий ограничению мощ-

ности ГЭУ; $k_h^{ом} = k_{h,1} = \frac{\eta_{0i,1}^{гт} H_{0,1}^{гт}}{\eta_{0i,0}^{гт} H_{0,0}^{гт}}$ — коэффициент,

учитывающий изменение изоэнтальпийного перепада энтальпий и внутреннего относительного КПД главных турбин на частичном режиме; $\bar{G}_{вп}$ — относительный расход пара на вспомогательные потребители, не зависящие от режима работы ГЭУ.

Максимальная величина снижения ОМ при работе ледокола с фиксированным регламентом проводки из типовой базы R_i в сравнении с ОМ, заданным неопытным судоводителем (см. рис. 2), составит

$$\begin{aligned} \Delta N_{гэу}^{ом(max)}(R_i) &= N_{гэу}^{ом(1)} - N_{гэу}^{ом(4)} = \\ &= N_{гэу}^{ом(1)} - \frac{1}{a_{1max}} [\hat{N}_{гэу}(R_i) + \Delta N_{гэд}^{рас}(R_i)]. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 4 показано изменение значений максимальных коэффициентов повышения мощности при маневре за пределами ОМ ГЭУ в зависимости от относительного расхода питательной воды перед маневром.

Эмпирическое математическое ожидание (или среднее по выборке R_i) можно оценить из соотношения

$$\hat{N}_{гэу}(R_i) = \frac{N_{гэу,1} + N_{гэу,2} + N_{гэу,3} + \dots + N_{гэу,n}}{n}. \quad (4)$$

Рассеивание мощности ГЭУ, превышающей математическое ожидание $\Delta N_{гэу}^{рас}(R_i)$ в выборке R_i , можно определить через эмпирическую (выборочную) дисперсию

$$\Delta N_{гэу}^{рас}(R_i) = 2\sigma(R_i), \quad (5)$$

где $\sigma(R_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (N_{гэу,k} - \hat{N}_{гэу})^2}$ — эмпириче-

ская дисперсия в выборке R_i .

Значение поправок на снижение ограничения мощности ГЭУ зависит от выбранного режима проводки (который, в свою очередь, зависит от состояния ледового покрова и принятого способа проводки) и коэффициента увеличения мощности ГЭУ за счет маневра за пределами ограничения мощности ГЭУ. Если маневрирование за пределом ограничения мощности не используется, то $a_1(\bar{G}_{пв}^{ом}) = 1$.

Период работы РУ и ПТУ на энергетических уровнях мощности в течение одной кампании активной зоны формально можно разделить на характерные интервалы с похожими условиями эксплуатации. Для ледокола наиболее характерны следующие типовые условия работы:

- свободное плавание по чистой воде;
- свободное плавание в разреженных льдах;
- буксирование в дрейфующих льдах;
- буксирование в припайных льдах;
- проводка лидированием;
- работа реверсами (набегами и ударами).

Продолжительность работы ледокола в обозначенных условиях может быть различной. При этом нецелесообразно длительно использовать ледокол при движении по чистой воде и в разреженных льдах. Главная цель ледоколов — буксирование и прокладывание каналов в ледяных массивах. Следовательно, эти условия работы по длительности должны быть преобладающими.

При дальнейшей детализации работы ледоколов можно для выделенных условий эксплуатации рас-

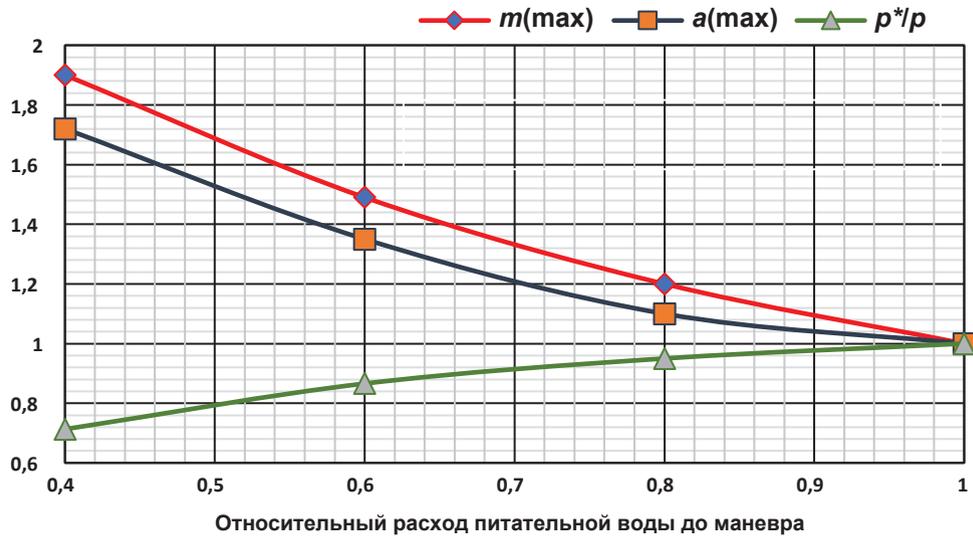


Рис. 4. Изменение максимально возможного относительного увеличения расхода питательной воды, относительной мощности ГЭУ и наибольшего относительного падения давления в ГП при маневре за пределами ОМ ГЭУ в зависимости от относительного расхода питательной воды перед маневром: $m_1^{\max} = \bar{G}_{\text{пв},1}^{\max(*)} / \bar{G}_{\text{пв},1}$ – максимальное увеличение относительного расхода питательной воды; $a_1^{\max} = \bar{N}_{\text{гт},1}^{\max(*)} / \bar{N}_{\text{гт},1}$ – максимальное увеличение относительной мощности ГЭУ; $p_{\text{гт},1}^{\min(*)} / p_{\text{гт}}^{\min}$ – максимальное снижение относительного давления в ГП по отношению к минимально поддерживаемому системой автоматизации

Fig. 4. Change in the maximum possible relative increase in the feed water flow rate, the relative power of the EPI and the largest relative pressure drop in the main steam line during maneuvering beyond the power limitation, depending on the relative flow rate of the feed water to the reactor plant before the maneuver: $m_1^{\max} = \bar{G}_{\text{пв},1}^{\max(*)} / \bar{G}_{\text{пв},1}$ – maximum increase in the relative consumption of feed water; $a_1^{\max} = \bar{N}_{\text{гт},1}^{\max(*)} / \bar{N}_{\text{гт},1}$ – maximum increase in the relative power of the EPI; $p_{\text{гт},1}^{\min(*)} / p_{\text{гт}}^{\min}$ – maximum decrease in the relative pressure in the main steam line in relation to the minimum maintained by the automation system

считать циклические процессы с определенными частотой и амплитудой изменения мощности ПТУ (ГЭД). Статистическая обработка данных по каждому из условий работы дает информацию, которая позволяет формализовать эксплуатацию ледокола на рассматриваемых интервалах времени.

Величина установленной мощности РУ на k -м интервале времени работы ледокола для идентифицированных судоводителем особенностей ледового покрова и режима проводки из типовой базы R_i оценивается по формулам

$$\bar{Q}_{p,k}^{\text{уст}}(R_i) = \frac{[\hat{N}_{\text{гэу}}(R_i) + \Delta N_{\text{гэу}}^{\text{рас}}(R_i)] \frac{1}{a^{\max}(\bar{G}_{\text{пв}}^{\text{ом}})}}{Q_{p,0} n_{\text{гэу}}(\hat{N}_{\text{гэу}})} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_{p,k}^{\text{уст}}(R_i) = Q_p^{6/\text{тр}} \times \frac{\left\{ [\hat{N}_{\text{гэу}}(R_i) + \Delta N_{\text{гэу}}^{\text{рас}}(R_i)] \frac{1}{a^{\max}(\bar{G}_{\text{пв}}^{\text{ом}})} \right\}}{Q_{p,0}} \quad (7)$$

где $Q_p^{6/\text{тр}}(N_{\text{гэу}})$ — функциональная связь между мощностью ГЭУ и мощностью реактора без твэла

пара в главный конденсатор; $Q_{p,0}$ — номинальная мощность реактора для данного проекта ледокола.

В [8] рассмотрены функциональные зависимости $Q_p^{6/\text{тр}}(N_{\text{гэу}})$ для ледоколов проектов 10521 и 10580. Эти зависимости в первом приближении могут быть применены для оценки показателей качества работы атомных ледоколов по экономии ядерного топлива при маневрировании.

Для оценки качества работы ледокола на ледовых трассах целесообразно ввести сопоставляемые обобщенные показатели использования ядерного топлива в различных условиях работы ледокола. Для этого можно оценивать коэффициент использования и перерасхода ЯТ на маневрирование в течение всей кампании активной зоны. Сопоставление этих показателей для различных атомных ледоколов (экипажей) позволит выявить переломный опыт и распространить его на другие атомные суда, эксплуатируемые в условиях Арктики [8; 9].

В общем случае в процессе эксплуатации ледокола задатчик режимов может переустанавливаться в различные положения в зависимости от ледовой обстановки и выполняемой работы, тогда значения коэффициентов использования (перерасхода) ядерного топлива на маневрирование при использовании системы раздельного управления (СРУ) за кампанию активной зоны можно определить из соотношений

$$k_{исп}^j = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} \left\{ \sum_{i=1}^{n_k} \left[Q_{p,ki}^{\delta/tp} (N_{гэу,ki}) \right] \Delta\tau_{ki} \right\}}{\sum_{k=1}^{n_j} \left[Q_{p,k}^{\delta/tp} (\widehat{N}_{гэу,k}) + \Delta Q_{p,k}^{tp} \right] \tau_k}, \quad (8)$$

$$\widehat{N}_{гэу,k} = \frac{1}{\tau_k} \sum_{i=1}^{n_k} (N_{гэу,ki} \Delta\tau_{ki}), \quad \tau_k = \sum_{i=1}^{n_k} \Delta\tau_{ki},$$

где n_j — количество изменений мощности реактора (перестановок задатчика режимов РУ) за кампанию активной зоны; n_k — количество изменений режимов ГЭУ (перестановок задатчика мощности ГЭУ) на k -м интервале времени; $N_{гэу,ki}$ — мощность ГЭУ в i -й момент на k -м интервале времени; $\Delta\tau_{ki}$ — длительность работы ГЭД на k -м интервале времени при i -м уровне мощности; τ_k — установленная мощность РУ на k -м интервале времени; $Q_{p,k}^{\delta/tp}$ — мощность реактора без травления на k -м интервале времени; $\Delta Q_{p,k}^{tp}$ — увеличение мощности реактора из-за травления на k -м интервале времени.

Чем выше значение $k_{исп}$, тем полезнее используется ядерное топливо на генерацию пара для ПТУ, а технико-эксплуатационные показатели ледокола выше. Однако с увеличением $k_{исп}$ возрастает количество маневров, производимых РУ, т. е. растет количество изменений мощности реактора n_j .

В качестве примера можно оценить значения коэффициентов использования ядерного топлива на маневрирование в условиях СРУ за кампанию активной зоны при различных вариантах назначения ограничения мощности ГЭУ. В [10] приведена гистограмма распределения времени работы реактора (активной зоны реактора) атомного ледокола «Таймыр» при различных уровнях мощности для ходового режима. Учитывая данные гистограммы, можно оценить приведенное время кампании, использованной для движения ледокола:

$$T_k^{np} = \frac{\varphi W_{p,0}}{Q_{p,0} \sum_i \bar{Q}_{p(i)} \cdot \Delta\bar{\tau}_{(i)}}, \quad (9)$$

где $\varphi = T_k^{лб} / T_k$ — относительная доля энергозапаса активной зоны, использованной для движения ледокола; $Q_{p(i)}$ — средняя относительная мощность реактора на i -м участке гистограммы; $\Delta\bar{\tau}_{(i)}$ — относительный интервал времени использования мощности реактора на i -м участке гистограммы.

С учетом принятого для оценок распределения мощности реактора на ходовом режиме, а также расчетного энергозапаса активной зоны $W_{p,0} = 2,2 \cdot 10^6$ МВт·ч длительность работы активной зоны для обеспечения движения судна определяется из соотношения, ч:

$$T_k^{np} = \varphi W_{p,0} [Q_{p,0} (\bar{Q}_{p(1)} \Delta\bar{\tau}_{(1)} + \bar{Q}_{p(2)} \Delta\bar{\tau}_{(2)} + \bar{Q}_{p(3)} \Delta\bar{\tau}_{(3)} + \bar{Q}_{p(4)} \Delta\bar{\tau}_{(4)} + \bar{Q}_{p(5)} \Delta\bar{\tau}_{(5)} + \bar{Q}_{p(6)} \Delta\bar{\tau}_{(6)} + \bar{Q}_{p(7)} \Delta\bar{\tau}_{(7)})]^{-1}, \quad (10)$$

где $\bar{Q}_{p(1)}, \bar{Q}_{p(2)}, \dots, \bar{Q}_{p(7)}$ — средние относительные мощности реактора для поддиапазонов гистограммы; $\Delta\bar{\tau}_{(1)}, \Delta\bar{\tau}_{(2)}, \Delta\bar{\tau}_{(3)}, \dots, \Delta\bar{\tau}_{(7)}$ — относительное время работы реактора в соответствующих поддиапазонах гистограммы.

Для последующих оценок принимается следующая упрощенная модель эксплуатации:

- свободное плавание по чистой воде и в разреженных льдах R_1 ;
- буксирование в дрейфующих льдах R_2 ;
- буксирование в припайных льдах R_3 ;
- проводка лидированием R_4 ;
- работа реверсами (набегами и ударами) R_5 .

Свободное плавание по чистой воде и в разреженных льдах целесообразно объединить в одну группу R_1 , расширив диапазон рассеивания мощности ГЭУ. При этом для движения не требуется большая мощность и необходимо умеренное рассеивание мощности. В расчетах принимается математическое ожидание мощности ГЭУ $\widehat{N}_{гэу}(R_1) = 5$ МВт при среднеквадратическом отклонении $\sigma^2(R_1) = 4$.

При буксировке на коротком буксире требуется маневрирование мощностью, обусловленное изменяющейся ледовой обстановкой. В дрейфующих льдах наблюдается чередование лед — вода, сжатие, разрежение, математическое ожидание мощности ГЭУ $\widehat{N}_{гэу}(R_2) = 12$ МВт при среднеквадратическом отклонении $\sigma^2(R_2) = 9$. Буксировка в припайных льдах требует большой мощности ПТУ (ГЭУ) при относительно незначительных отклонениях мощности ПТУ. В припайных льдах в первом приближении можно принять эмпирическое математическое ожидание мощности ГЭУ $\widehat{N}_{гэу}(R_3) = 15$ МВт и среднеквадратическое отклонение $\sigma^2(R_3) = 9$. Действия судоводителя носят упреждающий характер. Частота изменения мощности ГЭУ определяется сменой ледовой обстановки.

При проводке лидированием требуется маневрирование мощностью, обусловленное изменяющейся ледовой обстановкой. Необходима высокая мобильность при поддержании дистанции между ледоколом и проводимым судном. Иногда необходимо быстро уйти от ведомого судна. Принимаются эмпирическое математическое ожидание мощности ГЭУ $\widehat{N}_{гэу}(R_4) = 18$ МВт и эмпирическая дисперсия $\sigma^2(R_4) = 20,25$.

При работе ледокола набегами и ударами (частые реверсы ГЭУ) реализуется большое количество циклов изменения мощности ПТУ от номинальной мощности до мощности холостого хода (по ТУ на поставку турбоагрегатов предусмотрена возможность 30 режимов реверсирования в час). При этом мощность реактора наибольшая. Этот режим работы

Кораблестроение для Арктики

имеет незначительную продолжительность и учитывается в последующих расчетах путем уменьшения часов работы ГЭУ в диапазоне относительных мощностей 91—100.

Допустим, что мощности ГЭУ при большом числе изменений в течение кампании описываются распределением по нормальному закону Гаусса. В этом случае плотность вероятностей распределения мощностей ГЭУ описывается выражением

$$p_i(N_{\text{гэу}}) = \frac{1}{\sigma(R_i)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[N_{\text{гэу}} - \hat{N}_{\text{гэу}}(R_i)]^2}{2[\sigma(R_i)]^2}}. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов коэффициентов использования ЯТ на маневрирование за кампанию активной зоны при различных вариантах назначения ограничения мощности ГЭУ.

Обсуждение

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показывает, что, используя при назначении ОМ верифицированные статистические данные по работе ГЭД, представленные в виде типовой базы фиксированных регламентов проводки R_i , а также технологию кратковременного маневра за пределами ОМ, можно повысить эффективность использования ядерного топлива активной зоны примерно в $k_{\text{исп},4}^{\text{кам}} / k_{\text{исп},1}^{\text{кам}} = 0,92 / 0,68 = 1,35$ раза. Это значит, что выполняемая ледоколом работа по проводке судов может быть увеличена более чем на треть при расчетном энергозапасе активной зоны. Длительное снижение устанавливаемой мощности реактора позволит в большей мере сохранить теплотехническую надежность активной зоны. Поскольку снижается максимальная плотность тепловых потоков в активной зоне, растет коэффициент запаса до кризиса теплообмена,

Таблица 1. Результаты расчетов коэффициентов использования ЯТ на маневрирование за кампанию активной зоны при различных вариантах назначения ограничения мощности ГЭУ

Величина	Вариант назначения ограничения мощности ГЭУ (см. рис. 2)			
	$N_{\text{гэу}}^{\text{ом}(1)}$	$N_{\text{гэу}}^{\text{ом}(2)}$	$N_{\text{гэу}}^{\text{ом}(3)}$	$N_{\text{гэу}}^{\text{ом}(4)}$
1. Свободное плавание по чистой воде и в разреженных льдах $N_{\text{гэу}}^{\text{ом}}(R_1)$, МВт	13	10	9	6
2. Ограничение мощности ГЭУ при буксировании в дрейфующих льдах $N_{\text{гэу}}^{\text{ом}}(R_2)$, МВт	23	19	18	13
3. Ограничение мощности ГЭУ при буксировании в припайных льдах $N_{\text{гэу}}^{\text{ом}}(R_3)$, МВт	25	22	21	16
4. Ограничение мощности ГЭУ при проводке лидированием $N_{\text{гэу}}^{\text{ом}}(R_4)$, МВт	30	28	27	23
5. Установленная мощность реактора при свободном плавании по чистой воде и в разреженных льдах $Q_p^{\text{уст}}(R_1)$	88	76	72	60
6. Установленная мощность реактора при буксировании в дрейфующих льдах $Q_p^{\text{уст}}(R_2)$, МВт	127	110	108	88
7. Установленная мощность реактора при буксировании в припайных льдах $Q_p^{\text{уст}}(R_3)$, МВт	135	123	120	100
8. Установленная мощность реактора при проводке лидированием $Q_p^{\text{уст}}(R_4)$, МВт	155	147	143	127
9. Энерговывработка при свободном плавании по чистой воде и в разреженных льдах $W_p(R_1)$, млн МВт·ч	0,39	0,34	0,32	0,27

Окончание табл.1

Величина	Вариант назначения ограничения мощности ГЭУ (см. рис. 2)			
	$N_{гзу}^{ом(1)}$	$N_{гзу}^{ом(2)}$	$N_{гзу}^{ом(3)}$	$N_{гзу}^{ом(4)}$
10. Энерговывработка при буксировании в дрейфующих льдах $W_p(R_2)$, млн МВт·ч	0,76	0,66	0,65	0,53
11. Энерговывработка при буксировании в припайных льдах $W_p(R_3)$, млн МВт·ч	0,63	0,58	0,56	0,47
12. Энерговывработка при проводке лидированием $W_p(R_4)$, млн МВт·ч	0,52	0,49	0,48	0,43
13. Энерговывработка на движении, млн МВт·ч	2,3	2,07	2,01	1,7
14. Энерговывработка с учетом стоянки с работающим реактором, млн МВт·ч	2,4	2,17	2,11	1,8
15. Энерговывработка без травления пара, млн МВт·ч	1,56	1,56	1,56	1,56
16. Коэффициент использования ЯТ на маневрирование за кампанию активной зоны $k_{исп}^{кам}$	0,68	0,75	0,78	0,92
17. Коэффициент перерасхода топлива на маневрирование за кампанию активной зоны $k_{п}^{кам}$	1,47	1,33	1,28	1,09

снижается максимальная температура оболочек и топливной композиции, уменьшается удельное накопление продуктов деления в ядерном топливе. Улучшение условий использования активной зоны, вероятнее всего, позволит сохранить ее герметичность к концу расчетной кампании и может стать предпосылкой для последующего «дожигания ядерного топлива» [10]. Это даст дополнительные экономические выгоды от применения предложенных решений. Кроме того, из-за снижения величины длительного травления пара в главные конденсаторы уменьшатся тепловые выбросы ледокола в воды арктических морей, что позитивно отразится на экологии Арктики.

Заключение

Приведенные оценочные расчеты следует считать предварительными. Если представленная проблематика представляет интерес для заинтересованных организаций, описанная методика может быть развернута более подробно. В частности, потребуется более детальная проработка статистических данных по загрузке ГЭУ при преодолении типовых участков с аналогичным ледяным покровом и принятом режиме проводки. Для решения этой задачи потребуются активное включение специалистов-аналитиков по судовождению. На основании обработки данных можно создать типовую базу

регламентов проводки со статистическими характеристиками этих режимов. Эта информация может быть использована для разработки программ, обеспечивающих расчеты величины ОМ для идентифицированного судоводителем участка пути, а также для расчетов коэффициентов использования ЯТ на маневрирование в течение кампании загруженной активной зоны.

Литература

1. Кашка М. М., Смирнов А. А., Головинский С. А. и др. Перспективы развития атомного ледокольного флота // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 98—107.
2. Кашка М. М., Мантула Н. В., Пономаренко А. В. Опыт и перспективы эксплуатации в Арктике атомного ледокольного флота // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 3 (7). — С. 84—91.
3. Королёв В. И., Лисина А. С. Применение скользящего давления пара в главном паропроводе атомного ледокола для уменьшения выгорания ядерного топлива // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы научно-практической конференции. 31 марта 2015 г. — Т. 2. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2015. — С. 103—109.
4. Королёв В. И. Основы эксплуатации и ремонта реакторных установок плавучих объектов с ядерной

Кораблестроение для Арктики

энергетической установкой: Учеб. пособие: В 2 ч. — Ч. 2. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2019. — 312 с.

5. Боровков В. М., Королёв В. И., Голубев С. Е. Исследование возможности применения программы управления мощностью методом скользящего давления пара для повышения технико-экономических показателей и улучшения маневренности энергоблока типа ВВЭР-1000: Отчет № 81008621, инв. № 0286. 0022744 / Ленингр. политехн. ин-т. — Л., 1984. — (ДСП).

6. Иванов В. А., Игнатенко Е. И., Боровков В. М. и др. Экспериментальное исследование работы энергоблока ВВЭР-440 в конце рабочей кампании при скользящем начальном давлении пара // Энергомашиностроение. — 1978. — № 4. — С. 23—25.

7. Королёв В. И., Костылев И. И., Ластовцев А. Ю. Особенности формирования и теплового расчета

пароконденсатного цикла судов и плавучих энергоблоков с ЯЭУ. — СПб.: Бэлл, 2006. — 208 с.

8. Королёв В. И. Разработка сравнительных показателей работы атомных ледоколов по затратам ядерного топлива на маневрирование // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адм. С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2016. — С. 160—168.

9. Королёв В. И., Ластовцев А. Ю. Маневренность и экономичность ядерных энергетических установок атомных ледоколов // Материалы научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. — СПб.: СПбГМТУ, 2013. — С. 150—153.

10. Королёв В. И. Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности. — СПб.: Мед. пресса, 2003. — 106 с.

Информация об авторе

Королёв Владимир Ильич, кандидат технических наук, профессор кафедры судовых ядерных энергетических установок, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова (198035, Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., 5/7), e-mail: vlikor2007@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

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

IMPROVING THE ECONOMIC PERFORMANCE OF NUCLEAR ICEBREAKERS WHEN NAVIGATING SHIPS IN THE ARCTIC

Korolev, V. I.

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

The article was received on November 30, 2020

Abstract

The most expensive part of nuclear icebreakers to be replaced is the reactor core, and therefore great importance was attached to increasing its energy storage and energy resource. At the first stage of the active zone development, it was possible to solve the problem of equalizing the calculated energy storage and the assigned energy resource. Another problem related to the icebreaker maneuvering in the Arctic is the unreasonably overestimated power limitation of the electric propulsion installation set by the navigator, leading to a decrease in the duration of the core campaign and its premature unloading from the reactor. The article proposes solutions that allow increasing the duration of the active zone campaign in the conditions of icebreaker maneuvering in the Arctic.

The author suggests achieving this by creating a standard base of fixed navigation regulations with known statistical power distributions on the propellers and by switching to the sliding steam pressure technology in the main steam line during maneuvering. This allows the navigator to increase quickly the power on the propellers directly from the wheelhouse without the reactor operator consent.

The article considers a numerical example using various options for power limitation of an electric propulsion installation. The calculation shows that due to the proposed option for setting the power limitation, it is possible, other things being equal, to save a third of the core energy reserve.

Keywords: *power limitation (PL), electric propulsion installation (EPI), maneuvering, mode setter, reactor power, navigation safety, main steam line, sliding steam pressure, steam etching, maneuver beyond the power limit, navigation regulations, empirical mathematical expectation, empirical variance, nuclear fuel, nuclear fuel utilization factor.*

References

1. Kashka M. M., Smirnov A. A., Golovinskiy S. A., Vorob'yov V. M., Ryzhkov A. V., Babich E. M. Prospects for the development of the nuclear icebreaker fleet. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2016, no. 3 (23), pp. 98—107. (In Russian).
2. Kashka M. M., Mantula N. V., Ponomarenko A. V. Experience and prospects of operation in the Arctic of the nuclear icebreaker fleet of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2012, no. 3 (7). pp. 84—91. (In Russian).
3. Korolev V. I., Lisina A. S. The use of sliding steam pressure in the main steam pipeline of an atomic icebreaker to reduce the burnout of nuclear fuel. *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 31 March 2015. St. Petersburg, Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2015, vol. 2, pp. 103—109. (In Russian).
4. Korolev V. I. Fundamentals of the operation and repair of reactor facilities of floating facilities with a nuclear power plant: In 2 parts. Pt. 2. St. Petersburg. Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2019, 312 p. (In Russian).
5. Borovkov V. M., Korolev V. I., Golubev C. E. Investigation of the possibility of using the power control program by the sliding steam pressure method to improve the technical and economic indicators and improve the maneuverability of a VVER-1000 power unit. Report. Leningradskiy politehnicheskii institute, 1984, no. 81008621, inv. no. 0286. 0022744 Leningrad. (In Russian).
6. Ivanov V. A., Ignatenko E. I., Borovkov V. M. Experimental study of the operation of a VVER-440 power unit at the end of a working campaign at a sliding initial steam pressure. *Energomashinostroenie*. [Power engineering], 1978, no. 4, pp. 23—25. (In Russian).
7. Korolev V. I., Kostylev I. I., Lastovtsev A. Yu. Features of the formation and thermal calculation of the vapor condensate cycle of ships and floating power units with a nuclear power plant. St. Petersburg, Bell, 2006, 208 p. (In Russian).
8. Korolev V. I. Development of comparative indicators of the operation of nuclear icebreakers in terms of the cost of nuclear fuel for maneuvering. *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni adm. S. O. Makarova* [Collection of scientific works of the faculty of GUMRF named after Adm. S. O. Makarov]. St. Petersburg, Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015, pp. 160—168. (In Russian).
9. Korolev V. I., Lastovtsev A. Yu. Maneuverability and efficiency of nuclear power plants of nuclear icebreakers. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. N. Krylova*. St. Petersburg, SPBGMTU, 2013, pp. 150—153. (In Russian).
10. Korolev V. I. Fundamentals of control of ship reactors when operating at power. St. Petersburg, Med. pressa, 2003, 106 p. (In Russian).

Information about the author

Korolev, Vladimir Ilyich, PhD in Engineering Science, Professor of the Department of “Ship nuclear power plants”, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, Russia, 198035), e-mail: vlikor2007@yandex.ru.

Bibliographic description of the article

Korolev V. I. Improving the economic performance of nuclear icebreakers when navigating ships in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 244—253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253. (In Russian).

© Korolev V. I., 2021