

Научная статья
УДК 629.12-8:621.039
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-1-70-80>
EDN XWYUFG

Использование скользящего давления пара в главном паропроводе для повышения экономических показателей энергетической установки атомных ледоколов

Владимир Ильич Королёв, Анатолий Иванович Лебедев[✉]

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Россия, kaf_snef@gumrf.ru*[✉]

Аннотация. При маневрировании ядерной энергетической установкой атомных ледоколов во льдах Арктики реализуется функциональное разделение производимой реакторной установкой мощности с мощностью гребной электрической установки, что связано с образованием оперативного запаса мощности на маневрирование. Из-за отсутствия четкой регламентации оптимального оперативного запаса мощности на маневрирование выбор его значения носит случайный характер, который зависит от интуитивного мнения и опыта судоводителя. Завышение оперативной мощности на маневрирование увеличивает интенсивность выгорания ядерного топлива на данном конкретном отрезке пути атомного ледокола. С точки зрения атомно-механической службы атомного ледокола следует минимизировать запрашиваемую судоводителем мощность реактора, однако это противоречит требованию судоводителей, для которых необходим повышенный оперативный запас мощности для безопасности маневра. Для сглаживания возникающего противоречия предлагается использовать скользящее давление пара в главном паропроводе для кратковременных маневров атомных ледоколов. Отмечается, что скользящее давление пара в паропроводе уже используется на ТЭС, ТЭЦ и АЭС, при этом решаются различные задачи, включающие экономию топлива, повышение надежности оборудования и т. д. На атомных ледоколах решается специфическая задача по снижению выгорания ядерного топлива при маневрировании за счет минимизации оперативного запаса мощности на маневрирование, от чего зависит количество перегружаемых сменяемых в реакторе активных зон – самой дорогой для атомного ледокола заменяемой части. Рассматриваются методические аспекты применения скользящего давления пара в главном паропроводе и разработана методика оценочного расчета получаемых эффектов по кратковременному повышению мощности гребной электрической установки. Расчеты выполнены для атомного ледокола проекта 10521. Указывается, что предложенная методика оценочного расчета может быть использована для любых других проектов атомных судов.

Ключевые слова: безопасное управление, согласование мощностей, реакторная установка, ограничение мощности, установленная мощность, оперативный запас, регулирующий клапан, клапан травления, питательный клапан, скользящее давление, главный паропровод, минимальное давление, перепад давлений

Для цитирования: Королёв В. И., Лебедев А. И. Использование скользящего давления пара в главном паропроводе для повышения экономических показателей энергетической установки атомных ледоколов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 1. С. 70–80. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-1-70-80>. EDN XWYUFG.

Original article

Using sliding steam pressure in the main steam pipeline to improve the economic performance of the nuclear icebreaker power plant

Vladimir I. Korolev, Anatoly I. Lebedev[✉]

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint Petersburg, Russia, kaf_snef@gumrf.ru*[✉]

Abstract. When maneuvering a nuclear power plant of nuclear icebreakers in the Arctic ice, a functional separation of the power produced by the reactor unit with the power of the electric propulsion system is implemented, which is

associated with the formation of an operational reserve of power for maneuvering. Due to the lack of clear regulation of the optimal operational reserve of maneuvering power, the choice of its value is random, which depends on the intuitive opinion of the skipper and the experience of the skipper. Overestimating the operational capacity for maneuvering increases the intensity of nuclear fuel burnout on this particular segment of the nuclear icebreaker's journey. From the point of view of the atomic mechanical service of a nuclear icebreaker, the reactor power requested by the skipper should be minimized, however, this contradicts the requirement of the skippers, who require an increased operational reserve of power for maneuver safety. To smooth out this contradiction, it is proposed to use sliding steam pressure in the main steam pipeline for short-term maneuvers of nuclear icebreakers. It is noted that the sliding steam pressure in the steam pipeline is already used at thermal power plants, thermal power plants and nuclear power plants, while various tasks are being solved, including saving fuel, increasing equipment reliability, etc. Nuclear icebreakers solve a specific task to reduce the burnout of nuclear fuel during maneuvering by minimizing the operational reserve of maneuvering power, which determines the number of removable cores in the reactor, which is the most expensive part for a nuclear icebreaker to replace. The methodological aspects of the application of sliding steam pressure in the main steam pipeline are considered and a method for estimating the effects obtained for a short-term increase in the power of the rowing electric installation is developed. The calculations were performed for the nuclear icebreaker project 10521. It is indicated that the proposed estimation methodology can be used for any other nuclear-powered vessel projects.

Keywords: safe management, power matching, reactor plant, power limitation, installed capacity, operational reserve, control valve, etching valve, feed valve, sliding pressure, main steam line, minimum pressure, pressure drop

For citation: Korolev V. I., Lebedev A. I. Using sliding steam pressure in the main steam pipeline to improve the economic performance of the nuclear icebreaker power plant. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies. 2025;1:70-80.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-1-70-80>. EDN XWYUFG.

Введение

В тяжелых льдах Арктики на атомных ледоколах используется система раздельного управления реакторной установки (РУ) и паротурбинной установки (ПТУ), а следовательно, и гребной электрической установки (ГЭУ). Данный способ управления рассматривается как единственно возможный в условиях Арктики. Обычно на определенном интервале времени движения ледокола вводится ограничение мощности (ОМ) ГЭУ, которое не должно превышать судоводителем [1]. Возникающее при этом разбалансирование мощностей между РУ и ГЭУ компенсируется сбросом «избыточного» пара, генерируемого РУ, через клапан травления (КТ) и дроссельно-увлажнительное устройство (ДУУ) в главный конденсатор ПТУ.

Функциональная связь между установленным ОМ ГЭУ и давлением в главном паропроводе (ГП), предусмотренная проектом, не позволяет судоводителю увеличивать мощность ГЭУ больше ОМ. Если данную функциональную связь временно разорвать, то при завышении мощности ГЭУ, установленного ОМ, давление в ГП снизится меньше минимально поддерживаемого системой автоматики значения и настолько больше, насколько больше составляет рассогласование между задаваемой в данный момент мощностью ГЭУ и ОМ ГЭУ. Таким образом, фактически реализуется работа за пределами ОМ ГЭУ со скользким давлением пара (СДП) в ГП [2].

Впервые в мировой практике технология СДП была применена на Кольской АЭС для продления кампании активной зоны на энергоблоке ВВЭР-440. Работы проводились под руководством основоположника данной технологии, профессора, доктора

технических наук В. А. Иванова. Значимость достигнутых результатов была высоко оценена, и большая группа персонала Кольской АЭС отмечена высокими государственными наградами СССР [3]. Известны и другие случаи использования технологии СДП в стационарной энергетике [4–7].

При эксплуатации атомных ледоколов использование технологии СДП позволит увеличить коэффициент использования ядерного топлива для данного ледокола и, соответственно, длительность эксплуатации активных зон [8]. Эффект достигается за счет снижения оперативного запаса мощности на маневрирование ГЭУ и соответствующей установленной избыточной мощности РУ и прохождения кратковременных пиковых значений мощности ГЭУ за пределами ОМ.

Технологию СДП следует рассматривать в широком смысле как работу ПТУ при вынужденном снижении давления пара в ГП, ниже поддерживаемого на статических режимах. При этом можно работать с минимальным дросселированием пара в регулирующих клапанах (РК) на переменных режимах, «дожигать» ядерное топливо за счет постепенного снижения средней температуры теплоносителя и давления пара в ГП (обеспечивается приемлемая влажность пара на последних ступенях главного турбоагрегата) [9].

При движении атомного ледокола во льдах Арктики оперативный запас мощности ΔQ_{rij}^{on} на маневрировании ГЭУ на j -м интервале времени Δt_j и неизменном положении питательного клапана (ПК), задающего установленную мощность РУ, может иметь следующие значения:

Korolev V. I., Lebedev A. I. Using sliding steam pressure in the main steam pipeline to improve the economic performance of the nuclear icebreaker power plant

$$Q_{pj}^{уст} - \frac{N_{ГЭУij}}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_{pj}^{оп} > 0; \quad (1)$$

$$Q_{pj}^{уст} - \frac{N_{ГЭУij}}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_{pj}^{оп} = 0; \quad (2)$$

$$Q_{pj}^{уст} - \frac{N_{ГЭУij}}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_{pj}^{оп} < 0; \quad (3)$$

$$\Delta \tau_j = \sum_{i=1}^N \Delta \tau_{ij}, \quad (4)$$

где $Q_{pj}^{уст}$ – мощность реактора, установленная инженером-оператором на j -м интервале времени $\Delta \tau_j$; $N_{ГЭУij}$ – мощность ГЭУ, задаваемая судоводителем в i -й текущий момент на j -м интервале времени; $\bar{\eta}_{ЯЭУj}$ – средний КПД ядерной энергетической установки (ЯЭУ) на j -м интервале времени.

В зависимости от принятых условий (1), (2) давление в ГП будет изменяться в пределах нормально поддерживаемого значения с помощью регуляторов давления. В случае (3) давление в ГП не поддерживается системой автоматического регулирования и реализуется технология СДП в ГП [1].

Методы и материалы исследования

На рис. 1 приведена графоаналитическая модель изменений давлений на характерных участках питательной магистрали при различных положениях КТ, ПК и РК, т. е. мощности главной турбины (ГТ) или главного турбогенератора. Питательная вода подается питательным насосом (ПН) в парогенераторы. При этом основные падения давления происходят на дроссельном клапане (ДК) и ПК. При варьировании расходом питательной воды перепад давления на ПК обеспечивается системой автоматического регулирования и поддерживается постоянным при помощи регулятора перепада давления астатического (РПД-А), а формируемый наклон статической характеристики турбопитательной установки обеспечивается за счет изменения перепада давления на ДК при помощи регулятора перепада давления статического (РПД-С) при варьировании расходом питательной воды. Для этого при каждом новом положении ПК по сигналу от РПД-С изменяются суммарный перепад давления на ПК и ДК, подача пара на турбопривод ПН и частота вращения ПН [10]. Одновременно изменяются проходное сечение ПК и расход питательной воды в парогенераторы. В зависимости от подачи питательной воды в парогенераторы суммарный общий перепад давлений на ПК и ДК находится в пределах 0,6–1,3 МПа (проект 10521) и 0,3–1,6 МПа на ПК (проект 22220).

Затем питательная вода поступает непосред-

ственно в парогенераторы, где нагревается до температуры насыщения при давлении в потоке, испаряется на испарительном участке, перегревается на пароперегревательном участке, и пар подается в ГП. Гидравлическое сопротивление парогенераторов со змеевиковой трубной системой змеевикового типа вместе с дроссельными участками составляет до 2,4 МПа (проект 10521), прямотрубных модульных – до 1,6 МПа.

В ГП при помощи статического регулятора давления пара поддерживается давление в заданных пределах, обусловленное статической характеристикой регулятора. При этом наклон статической характеристики (статизм) выбирается из условия устойчивости параллельной работы двух турбогенераторов, включенных в общую паровую магистраль. На ледоколах проектов 10521 давление поддерживается регулятором системы регулирования управления и защиты главного турбогенератора Кировского завода «КЗ» [10]. Исполнительным органом данного регулятора является КТ.

При полном относительном открытии КТ ($\bar{G}_{КТ} = 1$) и ПК ($\bar{G}_{ПК} = 1$) устанавливается максимальное давление пара в ГП ($p_{ГП}^{max} = 3,2$ МПа) и весь пар поступает на травление в главный конденсатор. При полном относительном закрытии КТ ($\bar{G}_{КТ} = 0$) весь пар поступает в ГТ и давление в ГП падает до минимального поддерживаемого значения ($p_{ГП}^{min} = 2,7$ МПа). Если часть пара из ГП поступает на ГТ через РК, а другая часть на травление через КТ, то в ГП устанавливается промежуточное давление, МПа: $2,7 < p_{ГП} < 3,2$. При полном открытии ПК максимальное давление питательной воды установится при травлении всего пара через КТ: $p_{ПНО}^{max}(\bar{G}_{КТ}=1)$ – кривая 1; минимальное давление при полном закрытии КТ: $p_{ПНО}^{min}(\bar{G}_{КТ}=0)$ – кривая 2.

На частичных режимах, допустим $\bar{G}_{ПВ} = 0,5$, и полном закрытии КТ в ГП установится давление $p_{ГП}^{min} = 2,7$ МПа. В данных условиях кривая 3 моделирует изменение давления на протяжении всей питательной магистрали. Падение давления на ДК здесь изменяется в соответствии со статической характеристикой регулирования питательной установки при сохранении перепада давления на ПК.

В дальнейшем происходит падение давления пара в быстрозапорном клапане (БЗК) и РК до давления $p_{ГТ}$ (давление перед ГТ). Если положение ПК не изменяется и при этом судоводитель совершает маневр за пределами ОМ ГЭУ, то за счет саморегулирования РУ ее мощность увеличивается и возрастает расход питательной воды в парогенераторы. В результате перепад давления на ПК увеличивается, при этом система регулирования турбопитатель-

ной установки (РПД-А) автоматически поддерживает постоянный перепад давлений на ПК, смещая рабочую точку на статической характеристике турбопитательного насоса. Это приводит к росту перепада давлений на ДК, частоты вращения ПН и подачи питательной воды в парогенераторы.

Кривая 4 на рис. 1 моделирует изменение давления по питательной магистрали при выполнении маневра за пределами ОМ ГЭУ. При этом реализуется падение давления в ГП ниже минимально

поддерживаемой величины. Далее пар поступает через БЗК и РК, который приоткрывается для поддержания частоты вращения ГТ. Дросселирование в РК уменьшается (кривая 4) и давление перед ГТ возрастает до $p_{ГТ}^*$. Примерно пропорционально увеличению давления возрастает расход пара в ГТ и мощность турбины, в результате энергетический баланс устанавливается при новых условиях.

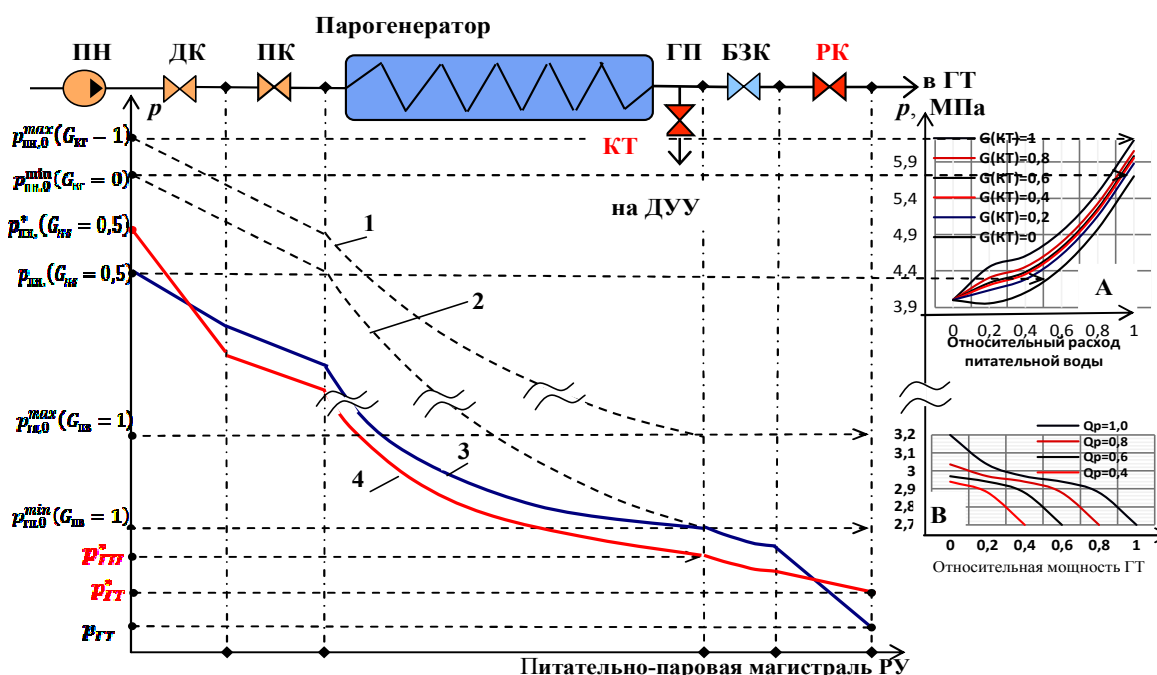


Рис. 1. Графоаналитическая модель изменений давления на характерных участках питательной магистрали при различных положениях КТ, ПК и относительной мощности ГТ

Fig. 1. Graphoanalytical model of pressure changes in characteristic sections of the feed line at different positions of the etching valve, the supply valve and the relative power of the main turbine

На рис. 2 приведена графоаналитическая модель изменения гидравлических характеристик оборудования в системе питания парогенераторов при маневрировании за пределами ОМ ГЭУ.

Статическая характеристика турбопитательной установки формируется при совместном действии двух регуляторов перепада давления: статического РПД-С и астатического РПД-А [10]. При перемещении ПК регулятор РПД-А формирует сигнал на поддержание постоянного перепада давлений на ПК за счет смещения нелинейной части перепада давления на ДК. При этом одновременно изменяется частота вращения турбопитательного насоса от ω_0 до ω_1 и эквидистантно смещаются характеристики ПН и питательной сети в координатной системе $p-G_{пв}$.

На рис. 2 также рассмотрен принцип формирова-

ния рабочих точек статической характеристики (4). Рабочие точки образуются при различных положениях ПК и частотах вращения ПН: номинальной ω_0 соответствует расход питательной воды – $G_{пв0}$ и произвольной $\omega_1 < \omega_0$ – $G_{пв1}$. Третья рабочая точка соответствует маневру за пределом ОМ ГЭУ при неизменном положении ПК. В результате перепад давлений на ПК возрастет и РПД-А сформирует сигнал на изменение перепада давлений на ДК при увеличенной частоте вращения ПН $\omega_1^* > \omega_1$. Одновременно характеристика ПН сместится в положение 22. Частота вращения ПН и общее гидравлическое сопротивление питательной сети возрастает, а давление в ГП снижается ($p_{ГП}^* < p_{ГП}^{min}$), что приводит к увеличению расхода питательной воды до $G_{пв1}^* > G_{пв1}$ (рис. 2).

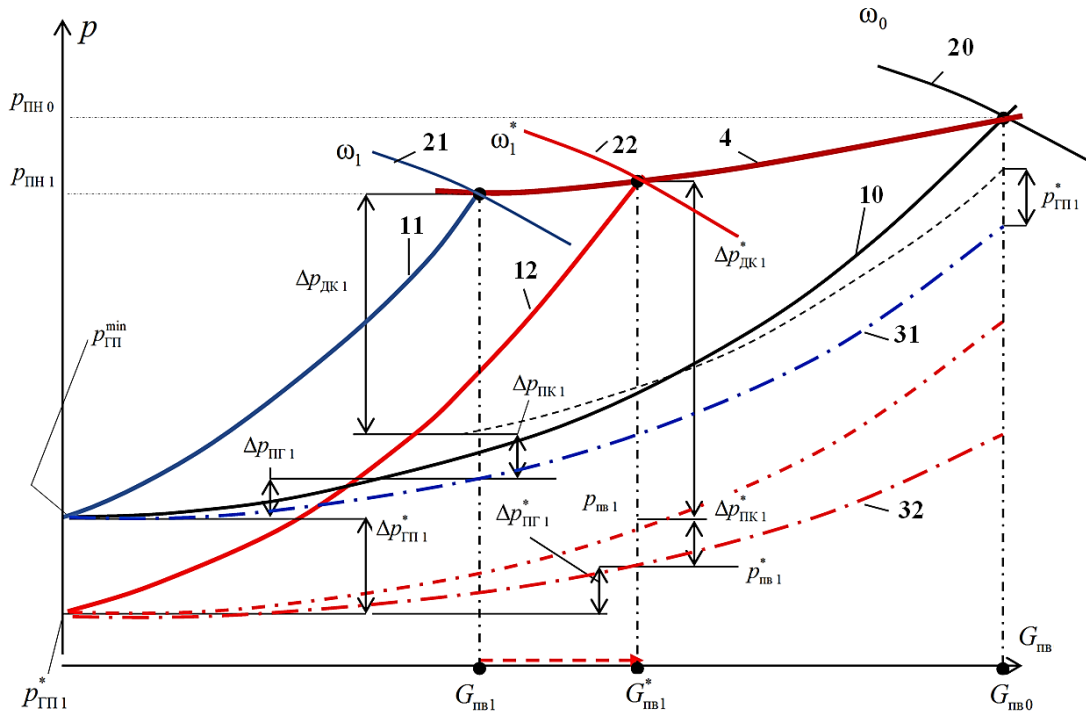


Рис. 2. Графоаналитическая модель гидравлических связей, образующихся в питательно-паровой системе РУ при маневрировании: 4 – статическая характеристика турбонасосной установки; 10–12 – гидравлические характеристики питающей сети при номинальном положении ПК, при частично закрытом ПК до маневра и после маневра соответственно; 20–22 – характеристики ПН при номинальной частоте вращения ω_0 , перед маневром ω_1 и после маневра ω_1^* соответственно; 31, 32 – гидравлические характеристики парогенераторов до маневра и после маневра соответственно

Fig. 2. Graphoanalytical model of hydraulic connections formed in the feed-steam system of a reactor installation during maneuvering: 4 – static characteristics of a turbopump installation; 10–12 – hydraulic characteristics of the supply network with the nominal position of the feed valve, with the feed valve partially closed before and after the maneuver, respectively; 20–22 – characteristics feed pump at the rated rotation speed ω_0 , before the maneuver ω_1 and after the maneuver ω_1^* respectively; 31, 32 – hydraulic characteristics of steam generators before and after the maneuver, respectively

На рис. 3 приведена графоаналитическая модель связей, образующихся между давлением в ГП, мощностью ГТ, расходами пара в ГТ и мощностью реактора при осуществлении маневра за пределами ОМ ГЭУ при разорванной связи по давлению между ГП и ОМ. Допустим, в точке f начинается маневр с увеличением мощности ГТ за счет перераспределения пара между КТ и РК при начальном относительном расходе пара $\bar{G}_{ГТн}$ и давлении в ГП соответственно $p_{ГПн}$. После закрытия КТ весь пар поступает в ГТ в количестве $\bar{G}_{ГТн}$, давление в ГП снижается до $p_{ГП}^{\min}$, мощность ГТ возрастает до $\bar{N}_{ГТн}^{\text{ор}}$, а установленная мощность реактора не изменяется $Q_{р1}^{\text{уст}}$ – точка f^* на рис. 3.

В реальной эксплуатации полученного увеличения изменения мощности $\Delta \bar{N}_{ГТн}^{\text{ор}}$ может быть недостаточно для реализации закладываемого су-

доводителем маневра, что вынуждает его предварительно запрашивать заведомо более высокую устанавливаемую (заданную) мощность реактора $Q_{р2}^{\text{уст}} \in [\bar{Q}_{р1}^{\text{зад}}]$, которой соответствует более высокий уровень ОМ ГЭУ – $\bar{N}_{ГТ2}^{\text{ор}}$. Однако, если перейти на технологию СДП в ГП, т. е. на снижение давления в ГП $p_{ГПн}^* < p_{ГП}^{\min}$ (точка f^{**}), то можно дополнительно увеличить относительную мощность ГЭУ на величину $\Delta \bar{N}_{ГТн}^*$, и в целом общее увеличение мощности составит $\Delta \bar{N}_{ГТн}^{\text{ор}+}$. Таким образом, продолжается маневр с увеличением мощности ГЭУ при разорванной функциональной связи между ОМ и давлением в ГП. При этом давление ГП падает до $p_{ГПн}^*$ за счет смещения характеристики питающей сети, расход питательной воды возрастает до $G_{пв1}^*$, а мощность реактора становится $Q_{р1}^* > Q_{р1}^{\text{уст}}$ (см. рис. 2, 3).

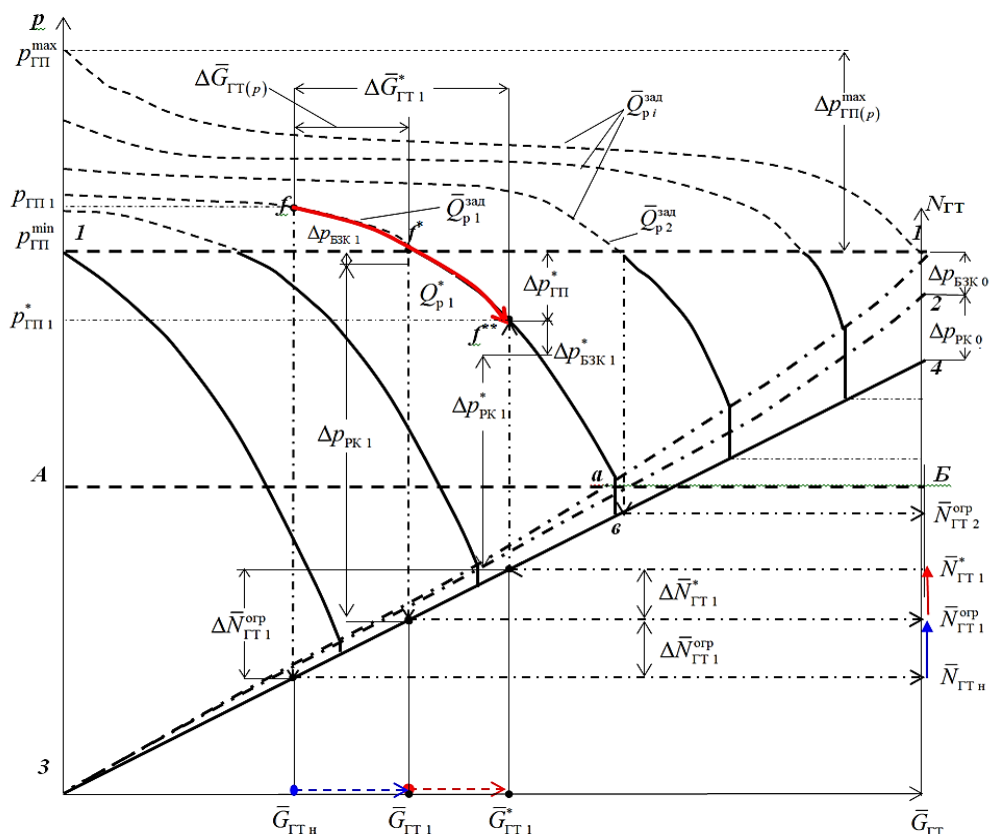


Рис. 3. Графоаналитическая модель связей, образующихся между давлением в ГП, мощностью ГТ, расходами пара в ГТ и мощностью реактора при осуществлении маневра за пределами ОМ ГЭУ (связь по давлению между ГП и ОМ разорвана):

- 1–3 – взаимосвязь давления пара перед БЗК с расходом пара в ГТ;
- 2–3 – взаимосвязь давления пара перед РК с расходом пара в ГТ;
- 3–4 – взаимосвязь давления перед соплами турбины с расходом пара в ГТ

Fig. 3. Graphoanalytical model of the relationships formed between the pressure in the main steam pipeline, the power of the main turbine, the steam consumption in the main turbine and the reactor power when operating beyond the power limit of the propeller electric installation (the pressure relationship between the main steam pipeline and the power limit is broken):

- 1–3 – the relationship of steam pressure before a quick-stop valve with steam flow in the main turbine;
- 2–3 – relationship of steam pressure in front of the regulating valve with steam flow in the main turbine;
- 3–4 – the relationship of pressure in front of turbine nozzles with steam flow in the main turbine

В этом случае РК дополнительно откроется и пропустит большее количество пара в ГТ – $G_{ГТ1}^*$. Одновременно возрастет мощность турбины до $\bar{N}_{ГТ1}^*$, уравнивая заданную судоводителем мощность ГЭУ. Таким образом, на гребных винтах получена дополнительная кратковременная мощность без перемещения ПК инженером-оператором.

Данное увеличение мощности может обеспечить выполнение необходимого кратковременного маневра без процедуры запрашивания нового ОМ ГЭУ, что обеспечивает высокую оперативность маневра непосредственно судоводителем. Если в дальнейшем для движения во льдах эта мощность

не снижается, то судоводитель заказывает новый уровень ОМ ГЭУ и последующая работа ЯЭУ проходит в штатном режиме, т. е. давление пара в ГП поддерживается в допустимых пределах.

С учетом допустимости применения СДП в ГП для совершения кратковременных маневров появляется возможность снизить предварительно запрашиваемую судоводителем избыточную мощность реактора без повышения опасности судовождения [2, 8].

Результаты исследования

Далее сформулированы основные методические подходы к возможной численной оценке результа-

тов использования технологии СДП в ГП для конкретного проекта атомного ледокола. В качестве примера рассматривается атомный ледокол проекта 10521. Опираясь на предложенный методический подход, подобная задача может быть решена для любого другого проекта атомного ледокола с учетом его особенностей.

Относительный расход питательной воды через парогенераторы до маневра для произвольного 1-го режима с превышением ОМ можно оценить следующим образом [11]:

$$\bar{G}_{\text{пв1}} = \frac{G_{\text{пв1}}}{G_{\text{пв0}}} = \frac{1}{G_{\text{пв0}}} \frac{Q_{\text{п1}}^{\text{зад}}}{h_{\text{ПГ1}} - h_{\text{пв1}}} = \frac{1}{G_{\text{пв0}}} \left[\frac{N_{\text{ГЭУ1}} k_{\text{сн}}}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}} \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{м}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}}} + G_{\text{КТ1}} (Q_{\text{п1}}^{\text{зад}} \cdot p_{\text{ПГ1}}) + G_{\text{ВП}} \right],$$

где $k_{\text{сн}}$ – коэффициент, учитывающий количество пара, поступающее на собственные нужды ПТУ (потребители 1-го рода); $h_{\text{ПГ1}}$; $h_{\text{пв1}}$ – энтальпии рабочего тела за парогенераторами и питательной воды, поступающей в парогенераторы соответственно; $\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}}$, $\eta_{\text{эл}}$, $\eta_{\text{м}}$ – внутренний относительный КПД ГТ, электрический (генератора и гребного электродвигателя) и механический КПД соответственно; $H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}}$ – изоэнтальпийный перепад энтальпий на ГТ.

Установленную мощность реактора можно представить следующим выражением:

$$Q_{\text{р}}^{\text{уст}} = (G_{\text{ПТУ}} + G_{\text{КТ}} + G_{\text{ВП}}) [h_{\text{ПГ}}(t_{\text{ПГ}}, p_{\text{ПГ}}) - h_{\text{пв}}(t_{\text{пв}}, p_{\text{пв}})].$$

Если судоводителем задана мощность больше ОМ $N_{\text{ГЭУ}}^{\text{зад}} \geq N_{\text{ГЭУ}}^{\text{ор}}$, то установившуюся при этом мощность реактора (или РУ) можно оценить из выражения

$$Q_{\text{п1}}^* = (G_{\text{ПТУ1}}^* + G_{\text{ВП}}) [h_{\text{ПГ1}}^*(t_{\text{ПГ1}}^*, p_{\text{ПГ1}}^*) - h_{\text{пв1}}^*(t_{\text{пв1}}^*, p_{\text{пв1}}^*)] = \frac{N_{\text{ГЭУ1}}^*}{\eta_{\text{ПТУ1}}^* \eta_{\text{эл1}}} + Q_{\text{ВП}}.$$

Оценим расход пара на ПТУ после маневра $N_{\text{ГЭУ1}}^* > N_{\text{ГЭУ1}}^{\text{ор}}$ (увеличения мощности ГЭУ больше величины ОМ). В этом случае мощность ПТУ должна возрасти до величины нагрузки с учетом имеющихся тепловых потерь. При этом расход пара на ПТУ можно оценить из выражения

$$G_{\text{ПТУ1}}^* = \frac{N_{\text{ГЭУ1}}^*}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}^*} \eta_{\text{эл1}} \eta_{\text{м}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}^*}} k_{\text{сн}}.$$

Абсолютный и относительный расходы питательной воды через парогенераторы после маневра равны: $G_{\text{пв1}}^* = G_{\text{ПГ1}}^* \approx G_{\text{ПТУ1}}^* + G_{\text{ВП}}$, или в относительной

форме:

$$\bar{G}_{\text{пв1}}^* = \frac{G_{\text{пв1}}^*}{G_{\text{пв0}}} = \frac{1}{G_{\text{пв0}}} \frac{Q_{\text{п1}}^*}{h_{\text{ПГ1}}^* - h_{\text{пв1}}^*} = \frac{1}{G_{\text{пв0}}} \left[\frac{N_{\text{ГЭУ1}}^*}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}^*} \eta_{\text{эл1}} \eta_{\text{м}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}^*}} k_{\text{сн}} + G_{\text{ВП}} \right].$$

Соотношения между расходами питательной воды перед маневром (при закрытом КТ) и после маневра можно выразить следующим образом:

$$m_1 = \frac{G_{\text{пв1}}^*}{G_{\text{пв1}}} = \frac{Q_{\text{п1}}^*}{Q_{\text{п1}}} \frac{h_{\text{ПГ1}} - h_{\text{пв1}}}{h_{\text{ПГ1}}^* - h_{\text{пв1}}^*},$$

откуда

$$Q_{\text{п1}}^* = Q_{\text{п1}} \frac{h_{\text{ПГ1}}^* - h_{\text{пв1}}^*}{h_{\text{ПГ1}} - h_{\text{пв1}}} m_1, \quad (5)$$

или с другой стороны

$$m_1 = \frac{G_{\text{пв1}}^*}{G_{\text{пв1}}} = \frac{\frac{N_{\text{ГЭУ1}}^*}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}^*} \eta_{\text{эл1}} \eta_{\text{м}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}^*}} k_{\text{сн}} + G_{\text{ВП}}}{\frac{N_{\text{ГЭУ1}}}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}} \eta_{\text{эл1}} \eta_{\text{м}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}}} k_{\text{сн}} + G_{\text{ВП}}},$$

где m_1 – увеличение расхода питательной воды при маневре ГЭУ за пределом ОМ (при закрытом КТ).

Допустим, что перед маневром КТ закрыт, тогда предыдущее выражение можно записать в следующем виде:

$$m_1 = \frac{1}{1 + \frac{G_{\text{ВП}}}{G_{\text{ПТУ1}}}} \left(\frac{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}}}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}^*} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}^*}} a_1 + \frac{G_{\text{ВП1}}}{G_{\text{ПТУ1}}} \right), \quad (6)$$

где

$$a_1 = \frac{N_{\text{ГЭУ1}}^*}{N_{\text{ГЭУ1}}} \approx \frac{N_{\text{ГТ1}}^*}{N_{\text{ГТ1}}} = \left[m_1 \left(1 + \frac{G_{\text{ВП1}}}{G_{\text{ПТУ1}}} \right) - \frac{G_{\text{ВП1}}}{G_{\text{ПТУ1}}} \right] \left(\frac{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}^*} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}^*}}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}}} \right) -$$

относительное изменение мощности ГЭУ при маневре за пределом ОМ ГЭУ.

Выразим величину a_1 через m_1 :

$$a_1 = \left[m_1 + \frac{\bar{G}_{\text{ВП}}}{\bar{G}_{\text{пв1}} - \bar{G}_{\text{ВП}}} (m_1 - 1) \right] \alpha_{\text{н1}}^*,$$

где $\alpha_{\text{н1}}^* = \frac{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}^*} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}^*}}{\eta_{0\text{Г1}}^{\text{ГТ}} H_{\text{а1}}^{\text{ГТ}}}$ – коэффициент, учитывающий

изменение параметров пара и внутреннего изоэнтальпийного КПД ГТ при маневре за пределом ОМ ГЭУ. Данный коэффициент, как правило, меньше единицы.

Далее преобразуем выражение

$$\frac{G_{\text{ВП}}}{G_{\text{ПТУ1}}} = \frac{G_{\text{ВП}}}{G_{\text{ВП}} \left(1 - \frac{G_{\text{ВП}}}{G_{\text{ВБ0}} \bar{Q}_{\text{П1}}}\right)} \approx \frac{G_{\text{ВП}}}{G_{\text{ВБ0}}} \frac{1}{\bar{Q}_{\text{П1}} \left(1 - \frac{G_{\text{ВП}}}{G_{\text{ВБ0}}} \cdot \frac{1}{\bar{Q}_{\text{П1}}}\right)} = \frac{G_{\text{ВП}} / G_{\text{ВБ0}}}{\bar{Q}_{\text{П1}} - G_{\text{ВП}} / G_{\text{ВБ0}}} = \frac{\bar{G}_{\text{ВП}}}{\bar{Q}_{\text{П1}} - \bar{G}_{\text{ВП}}}. \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (6) можно привести к виду:

$$m_1 = \frac{1}{\bar{Q}_{\text{П1}}} \left[(\bar{Q}_{\text{П1}}^{\text{зад}} - \bar{G}_{\text{ВП}}) \frac{a_1}{\alpha_{h1}^*} + \bar{G}_{\text{ВП}} \right].$$

При этом относительную мощность реактора, которая установится после маневра за пределами ОМ ГЭУ (при закрытом КТ), с учетом выражений (5) и (7) можно записать в следующем виде:

$$\bar{Q}_{\text{П1}}^* = \left[(\bar{Q}_{\text{П1}}^{\text{зад}} - \bar{G}_{\text{ВП}}) \frac{a_1}{\alpha_{h1}^*} + \bar{G}_{\text{ВП}} \right] \frac{h_{\text{ПГ1}}^* - h_{\text{ВБ1}}^*}{h_{\text{ПГ1}} - h_{\text{ВБ1}}}.$$

На рис. 3 показана графоаналитическая модель изменения гидравлических характеристик оборудования в системе питания парогенераторов при маневрировании за пределами ОМ ГЭУ. В соответствии с приведенной моделью давление питательной воды перед парогенератором после маневра определяется из выражения

$$p_{\text{ВБ1}}^* = p_{\text{ГП1}}^* + \Delta p_{\text{ПГ0}} (\bar{Q}_{\text{П1}}^{\text{зад}} m_1)^2 \approx p_{\text{ГП1}}^* + 2,4 (\bar{Q}_{\text{П1}}^{\text{зад}} m_1)^2.$$

С учетом гидравлических потерь в органах управления ГТ (БЗК и РК) давление в ГП при открытии РК можно оценить по формуле

$$p_{\text{ГП1}}^* \approx 2,19 \bar{N}_{\text{ГТ1}} a_1 + (\Delta p_{\text{БЗК0}} + \Delta p_{\text{РК0}}) (\bar{G}_{\text{ВБ1}} m_1)^2 + 0,0796 \approx 2,19 \bar{N}_{\text{ГТ1}} m_1 + 0,45 \bar{G}_{\text{ВБ1}}^2 m_1^2 + 0,08.$$

Выразим начальную относительную мощность ГТ через относительный расход питательной воды:

$$\bar{N}_{\text{ГЭУ1}} = \frac{\bar{G}_{\text{ВБ1}} - \bar{G}_{\text{ВП}}}{1 - \bar{G}_{\text{ВП}}} k_{h1},$$

тогда

$$p_{\text{ГП1}}^* \approx 2,19 \frac{\bar{G}_{\text{ВБ1}} - \bar{G}_{\text{ВП}}}{1 - \bar{G}_{\text{ВП}}} k_{h1} m_1 + 0,45 \bar{G}_{\text{ВБ1}}^2 m_1^2 + 0,08 = 2,6 (\bar{G}_{\text{ВБ1}} - 0,16) k_{h1} m_1 + 0,45 \bar{G}_{\text{ВБ1}}^2 m_1^2 + 0,08, \quad (8)$$

где $k_{h1} = \frac{\eta_{0i1}^{\text{ГТ}} H_{a1}^{\text{ГТ}}}{\eta_{0i0}^{\text{ГТ}} H_{a0}^{\text{ГТ}}}$ – коэффициент, учитывающий

снижение перепада энтальпий при переходе на СДП в ГП; $\bar{G}_{\text{ВП}} = G_{\text{ВП}} / G_{\text{ВБ0}}$ – доля пара, поступающего на вспомогательные потребители (здесь принята 0,16); 0,45 – суммарное гидравлическое сопротивление органов управления и защиты при номинальном открытии РК [12]; $\bar{G}_{\text{ВБ1}} = G_{\text{ВБ1}} / G_{\text{ВБ0}}$ – относительный расход питательной воды через

парогенератор перед маневром.

После маневра расход питательной воды возрастает с $G_{\text{ВБ1}}$ до $G_{\text{ВБ1}}^*$; следовательно, падение давления на ПК также возрастает с $\Delta p_{\text{ПК1}}$ до $\Delta p_{\text{ПК1}}^* \approx \Delta p_{\text{ПК1}} (m_1)^2$, а общее изменение перепада составит $\delta p_{\text{ПК1}}^* \approx \Delta p_{\text{ПК1}} (m_1^2 - 1)$. При этом астатический регулятор перепада давления восстанавливает поддерживаемый перепад давления на ПК, а избыточный перепад реализуется на ДК (см. рис. 3). В этом случае предполагается, что частота вращения турбопитательного насоса возрастет для перекачки необходимого количества питательной воды ($G_{\text{ВБ1}}^* > G_{\text{ВБ1}}$). Одновременно растет суммарный перепад давлений на ДК и ПК. Если приоткрыть ПК в новое положение, соответствующее ОМ по ГЭУ для $\bar{Q}_{\text{П1}}^*$, то давление в ГП увеличится до минимального поддерживаемого.

Учитывая изложенные соображения, давление в ГП после маневра можно оценивать по формуле

$$p_{\text{ГП1}}^* \approx p_{\text{ГП1}}^{\text{мин}} - \Delta p_{\text{ПК0}} [m_1^2 - 1] = 2,7 - 0,3 [m_1^2 - 1]. \quad (9)$$

Здесь принято $\Delta p_{\text{ПК0}} = 0,3$ МПа и $p_{\text{ГП1}}^{\text{мин}} = 2,7$ МПа [11].

Приравняем выражения (8) и (9) и после преобразований получим квадратное уравнение:

$$-(0,45 \bar{G}_{\text{ВБ1}}^2 + 0,3) m_1^2 - (2,6 \bar{G}_{\text{ВБ1}} - 0,416) m_1 + 2,92 = 0. \quad (10)$$

Квадратное уравнение (10) имеет действительные корни (решение) относительно величины m_1 следующего вида:

$$m_1 = \frac{1,3 \bar{G}_{\text{ВБ1}} - 0,208 - \sqrt{3 \bar{G}_{\text{ВБ1}}^2 - 0,54 \bar{G}_{\text{ВБ1}} + 0,92}}{-0,45 \bar{G}_{\text{ВБ1}}^2 - 0,3}.$$

Относительную мощность ГЭУ для произвольного 1-го режима можно представить в следующем виде:

$$\bar{N}_{\text{ГЭУ1}} = \frac{\bar{G}_{\text{ВБ1}} - \bar{G}_{\text{ВП}}}{1 - \bar{G}_{\text{ВП}}} k_{h1}, \text{ откуда}$$

$$\bar{G}_{\text{ВБ1}} = \frac{\bar{N}_{\text{ГЭУ1}}}{k_{h1}} (1 - \bar{G}_{\text{ВП}}) + \bar{G}_{\text{ВП}}.$$

Коэффициент k_{h1} можно представить в виде [11]:

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

После преобразований можно получить следующее выражение:

$$m_1 = \frac{1,1 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - \sqrt{2,1 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 + 0,356 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} + 0,83}}{-0,315 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 - 0,12 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - 0,3}. \quad (11)$$

По формуле (11) можно оценить относительное увеличение расхода питательной воды в парогенераторы при кратковременном маневре за пределом ОМ, если аргументом является относительная мощность ГЭУ до маневра.

Обсуждение

Основным результатом применения СДП в ГП для ЯЭУ атомных ледоколов является снижение выгорания ядерного топлива при учете судоводителем возможности самостоятельного кратковременного маневра за пределами ОМ ГЭУ. Это позволяет увеличить длительность кампании загруженной активной зоны при выполнении ледоколом работ в условиях Арктики. В работе [8] приведены результаты оценки максимально возможного относительного увеличения расхода питательной воды: $m_1^{\max} = \bar{G}_{пв1}^{\max(*)} / \bar{G}_{пв1}$ (11), относительной мощности ГЭУ: $a_1^{\max} = \bar{N}_{ГЭУ1}^{\max(*)} / \bar{N}_{ГЭУ1}$, наибольшего относительного падения давления в ГП по отношению к минимально поддерживаемому системой автоматики: $p_{ГП1}^* / p_{ГП1}^{\min}$ при маневре за пределами ОМ ГЭУ в зависимости от относительного расхода питательной воды на РУ перед маневром и до него.

В работе [8] также отмечаются и другие позитивные стороны, которые проявляются при снижении избыточной мощности реактора (оперативного

запаса мощности на маневрирование) при эксплуатации атомного ледокола РУ в условиях Арктики:

- повышение теплотехнической надежности активной зоны;
- снижение удельного накопления продуктов деления в ядерном топливе;
- улучшение условий для «дожигания» ядерного топлива;
- уменьшение тепловых выбросов ледокола в воды Арктического бассейна ввиду снижения величины травления пара из ГП в главные конденсаторы, что позитивно отразится на экологии Арктики.

Заключение

Технология СДП в ГП при маневрировании за пределом ОМ ГЭУ позволяет при прочих равных условиях увеличить длительность кампании активной зоны за счет снижения влияния человеческого фактора в выборе режима эксплуатации ЯЭУ атомного ледокола в условиях неопределенности внешних препятствий. В работе [8] доказано, что при сочетании СДП в ГП и наличии статистической базы фиксированных регламентов проводки можно получить увеличение продолжительности использования активной зоны до 35 %. Это дает существенную экономию ядерного топлива и значительно повышает экономические показатели атомных ледоколов в части оптимального использования ядерного топлива при выполнении проводок судов в Арктике. 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 источников

1. Королёв В. И. Особенности маневренных режимов эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2023. Т. 15. № 1. С. 109–125.
2. 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 науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 31 марта 2015 г.). СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. Т. 2. С. 103–109.
3. Иванов В. А., Игнатенко Е. И., Боровков В. М., Кучерский Ю. А., Пыткин Ю. Н. Экспериментальное исследование работы энергоблока ВВЭР-440 в конце рабочей кампании при скользящем начальном давлении пара // Энергомашиностроение. 1978. № 4. С. 23–25.
4. Исследование возможности применения программы управления мощностью методом скользящего давления пара для повышения технико-экономических показателей и улучшения маневренности энергоблока типа ВВЭР-1000: отчет / Ленинград. политех. ин-т: науч. рук.: Королёв В. И., Боровков В. М., Голубев С. Е., Глыга С. Н. Л., 1984. № 81008621. Инв. № 02860022744.
5. Королев В. И. Совершенствование тепловой схемы, контроля и способов эксплуатации для повышения надежности и технико-экономических показателей влажнопаровых турбин в период продления кампании: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1986. 256 с.
6. Королёв В. И., Иванов В. А., Трофимов Б. А., Литвинов А. Н. Экспериментальное исследование работы энергоблока ВВЭР-440 при отключении первой ступени промежуточного перегрева пара // Теплофизика ядерных энергетических установок. Свердловск: Изд-во УПИ, 1989. С. 133–137.
7. Иванов В. А., Королёв В. И. Исследование возможности получения дополнительной мощности на энергоблоках за счет изменения режима работы первой ступени промперегрева // Деп. в ВИНТИ. 1986. № 2266. С. 13.
8. Королев В. И. Повышение экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проводке

судов в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 244–252.

9. Королев В. И., Ластовцев А. Ю. Разработка предложений по экономии ядерного топлива на атомных ледоколах // Сб. науч. тр. Ежегод. науч.-практ. конф. профессор.-преподават. состава ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова (Санкт-Петербург, 11–15 апреля 2016 г.). СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. С. 152–160.

10. Королев В. И. Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности. СПб.:

Мед. пресса, 2003. 106 с.

11. Королёв В. И., Костылев И. И., Ластовцев А. Ю. Особенности формирования и теплового расчета пароконденсатного цикла судовых и плавучих энергоблоков с ядерной энергетической установкой. СПб.: Бэлл, 2006. 208 с.

12. Определение экономичности турбины ГТГ-642 на спецификационных режимах по данным ходовых испытаний атомного ледокола «Арктика». ПО «КЗ», отчет С-33 ОТ, 1981. 115 с.

References

1. Korolyov V. I. Osobennosti manevrennykh rezhimov ekspluatsii reaktornykh ustanovok atomnykh ledokolov pri rabote v usloviyakh Arktiki [Features of maneuverable operating modes of nuclear icebreaker reactor installations when operating in Arctic conditions]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 109-125.

2. Korolyov V. I., Lisina A. S. Primenenie skol'zyashchego davleniya para v glavnom paroprovoде atomnogo ledokola dlya umen'sheniya vygoraniya yadernogo topliva. Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy [The use of sliding steam pressure in the main steam line of a nuclear icebreaker to reduce nuclear fuel burnout. Marine education: traditions, realities and prospects]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 31 marta 2015 g.)*. Saint Petersburg, Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015. Vol. 2. Pp. 103-109.

3. Ivanov V. A., Ignatenko E. I., Borovkov V. M., Kucherskiy Yu. A., Pytkin Yu. N. Eksperimental'noe issledovanie raboty energobloka VVER-440 v konce rabochej kampanii pri skol'zyashchem nachal'nom davlenii para [Experimental study of the operation of the VVER-440 power unit at the end of the working campaign at a sliding initial steam pressure]. *Energomashinostroenie*, 1978, no. 4, pp. 23-25.

4. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya programmy upravleniya moshchnost'yu metodom skol'zyashchego davleniya para dlya povysheniya tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelej i uluchsheniya manevrennosti energobloka tipa VVER-1000 [Investigation of the possibility of using a sliding steam pressure power management program to improve technical and economic performance and improve the maneuverability of a VVER-1000 type power unit]. *Otchet. Leningradskij politekhnicheskij institut: nauchnye rukovoditeli: Korolyov V. I., Borovkov V. M., Golubev S. E., Glyba S. N.* Leningrad, 1984. N. 81008621. Inv. N. 02860022744.

5. Korolev V. I. Sovershenstvovanie teplovoj skhemy, kontrolya i sposobov ekspluatsii dlya povysheniya nadezhnosti i tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelej vlahnoparovykh turbin v period prodleniya kampanii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of the thermal scheme, control and operating methods to improve the reliability and technical and economic performance of wet-steam turbines during the campaign extension period: dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Leningrad, 1986. 256 p.

6. Korolev V. I., Ivanov V. A., Trofimov B. A., Litvi-

nov A. N. Eksperimental'noe issledovanie raboty energobloka VVER-440 pri otklyuchenii pervoj stupeni promezhutochnogo peregreva para [Experimental study of the operation of the VVER-440 power unit during shutdown of the first stage of intermediate steam overheating]. *Teplofizika yadernykh energeticheskikh ustanovok*. Sverdlovsk, Izd-vo UPI, 1989. Pp. 133-137.

7. Ivanov V. A., Korolyov V. I. Issledovanie vozmozhnosti polucheniya dopolnitel'noj moshchnosti na energobloках za schet izmeneniya rezhima raboty pervoj stupeni promperegreva [Investigation of the possibility of obtaining additional power at power units by changing the operating mode of the first stage of industrial superheating]. *Deponirovannye nauchnye raboty v VINITI*, 1986, no. 2266, p. 13.

8. Korolev V. I. Povysenie ekonomicheskikh pokazatelej ekspluatsii atomnykh ledokolov pri provodke sudov v Arktike [Improving the economic performance of nuclear icebreakers when sailing ships in the Arctic]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 244-252.

9. Korolev V. I., Lastovcev A. Yu. Razrabotka predlozhenij po ekonomii yadernogo topliva na atomnykh ledokolah [Development of proposals for saving nuclear fuel on nuclear icebreakers]. *Sbornik nauchnykh trudov Ezhegodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admirala S. O. Makarova (Sankt-Peterburg, 11–15 aprelya 2016 g.)*. Saint Petersburg, Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2016. Pp. 152-160.

10. Korolev V. I. Osnovy upravleniya sudovymi reaktornymi ustanovkami pri rabote na moshchnosti [Fundamentals of ship reactor plant management when operating at capacity]. Saint Petersburg, Medicinskaya pressa Publ., 2003. 106 p.

11. Korolyov V. I., Kostylev I. I., Lastovcev A. Yu. Osobennosti formirovaniya i teplovogo rascheta parokondensatnogo cikla sudovykh i plavuchih energoblokov s yadernoj energeticheskoy ustanovкой [Features of the formation and thermal calculation of the steam condensate cycle of marine and floating power units with a nuclear power plant]. Saint Petersburg, Bell Publ., 2006. 208 p.

12. Opredelenie ekonomichnosti turbiny GTG-642 na specifikacionnykh rezhimakh po dannym hodovykh ispytaniy atomnogo ledokola «Arktika» [Determination of the efficiency of the GTG-642 turbine in the specification modes according to the sea trials of the nuclear icebreaker "Arctic"]. PO «KZ», otchet S-33 OT, 1981. 115 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Ильич Королёв – кандидат технических наук, доцент; профессор кафедры судовых ядерных энергетических установок; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; kaf_snef@gumrf.ru

Анатолий Иванович Лебедев – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой судовых ядерных энергетических установок; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; kaf_snef@gumrf.ru

Vladimir I. Korolev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Marine Nuclear Power Plants; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; kaf_snef@gumrf.ru

Anatoly I. Lebedev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Marine Nuclear Power Plants; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; kaf_snef@gumrf.ru

