



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.12
EDN WRURVX

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМЫ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНОГО ТУРБОАГРЕГАТА АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА ПРОЕКТА 22220

В.А. Гулый, канд. техн. наук, КБ «Автоматика», 198188 Россия, Санкт-Петербург, ул. Возрождения 20А, лит. А, e-mail: gbavladimir@yandex.ru

В.В. Кондратьев, главный инженер, ФГУП «Атомфлот», 183038 Мурманск, тер. Мурманск-17, 1, e-mail: lleddokoll@gmail.com

Целью настоящей статьи является формулирование некоторых перспективных направлений развития и совершенствования системы парораспределения и силового электрогидравлического комплекса управления паровыми клапанами турбоагрегата главной паротурбинной установки ПТУ-72, устанавливаемой на ледоколы проекта 22220 и являющейся базовой для применения на перспективных ледокольных судах и плавучих атомных электростанциях.

В статье рассмотрены конструктивные особенности паровых клапанов и приводной части системы управления турбоагрегатом, которые, по мнению авторов, требуют доработки в рамках модернизации энергоустановок атомных ледоколов в течение их эксплуатации, а также требуют учета при разработке новых перспективных судовых энергоагрегатов.

Возможности совершенствования системы парораспределения рассмотрены в двух направлениях: конструкции собственно регулирующих паровых клапанов и конструкции электрогидравлического силового комплекса управления паровыми клапанами. Сформулированы следующие предложения, которые целесообразно обсудить при разработке конструкций новых паротурбинных агрегатов атомных судов:

- 1) исключить неоправданное дублирование паровых клапанов на ГТА перспективных проектов и вернуться к отработанной схеме подвода пара на турбинах атомных ледоколов предыдущего поколения;
- 2) применить неметаллические композиционные материалы в конструкции перспективных органов парораспределения турбомашин;
- 3) провести унификацию паровых клапанов регулирующего и травления, исключив из клапана травления разгрузочный клапан с заменой его каналом разгрузки и конструктивно обеспечив процесс самоустановки поршня на штоке внутри перфорированной втулки;
- 4) в перспективных проектах ледоколов — уменьшить давление рабочей среды в гидросистеме управления паровыми клапанами ГТА, что определено снизит требования к элементам гидроуправления и позволит перейти к более простым техническим решениям с переходом на отечественные средства гидроуправления, а возможно — к электромеханическому исполнению сервоприводов управления паровыми клапанами;
- 5) изменить алгоритм управления регулирующими клапанами турбоагрегатов серийных атомных ледоколов проекта 22220, дополнив алгоритм функционалом, обеспечивающим увеличение ресурса паровых клапанов, осуществив модернизацию электронной цифровой части системы управления паровой турбиной.

Предложения по совершенствованию системы парораспределения серийных атомных ледоколов могут найти применение в проектируемых СЭУ атомного ледокола проекта 10510 «Лидер», а также в турбогенераторных установках атомных плавучих энергоблоков, где применение разгруженных паровых клапанов может открыть дорогу применению электромеханических силовых приводов паровых клапанов в турбоагрегатах с исключением из приводов гидравлических высоконапорных сред.

Ключевые слова: атомный ледокол, турбоагрегат, система парораспределения, силовой электрогидравлический комплекс управления, унификация паровых клапанов, неметаллический композиционный материал, шток клапана, перфорированная втулка, средства гидроуправления, электромеханический сервопривод, ресурс паровых клапанов.

Для цитирования: Гулый В.А. Некоторые предложения по совершенствованию системы парораспределения главного турбоагрегата атомного ледокола проекта 22220 / В.А. Гулый, В.В. Кондратьев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 137 — 147. — EDN WRURVX.

SOME SUGGESTIONS FOR IMPROVING THE STEAM DISTRIBUTION SYSTEM OF THE MAIN TURBINE UNIT OF THE NUCLEAR ICEBREAKER PROJECT 22220

V.A. Gulyi, PhD, Avtomatika Design Bureau, 198188 Russia, St. Petersburg, ul. Vozrozhdeniya 20A, lit. A, e-mail: gbavladimir@yandex.ru

V.V. Kondratiev, Chief Engineer of FSUE Atomflot, 183038 Murmansk, ter. Murmansk-17, 1, e-mail: lleddokkoll@gmail.com

The purpose of this article is to determine some prospective areas for the development and improvement of the steam distribution system and the electrohydraulic power control system for steam valves of the turbine unit of the main steam turbine unit PTU-72, installed on icebreakers of project 22220, and which is the base for use on prospective icebreaking vessels and floating nuclear power plants.

The article considers the design features of steam valves and of the drive part of the turbine control system, which, according to the authors, require further development as part of the modernization of nuclear icebreaker power plants during their operation, and also require consideration when developing new advanced marine power units.

Possible ways to improve the steam distribution system are considered in two areas: the design of control steam valves themselves and the design of electrohydraulic power complex for controlling steam valves.

The following suggestions are formulated for consideration in the design of new steam turbine units for nuclear-powered vessels:

- 1) to consider the issue of eliminating unjustified duplication of steam valves on the main turbine unit (MTU) of prospective projects and returning to the proven scheme of steam supply on turbines of nuclear icebreakers of the previous generation;
- 2) to consider the use of non-metallic composite materials in the design of prospective turbomachinery steam distribution systems;
- 3) to unify the steam control and etching valves with the exclusion of the relief valve from the etching valve, replacing it with an unloading channel, and structurally ensuring the process of self-mounting the piston on the rod inside the perforated sleeve;
- 4) in prospective icebreaker projects, to consider the possibility of reducing the pressure of the working medium in the hydraulic control system of the MTU steam valves, which will obviously reduce the requirements for hydraulic control elements and allow for simpler technical solutions with the transition to domestic hydraulic control systems, and possibly to the electromechanical design of steam valve control servos;
- 5) to change the control algorithm for control valves of turbine units of serial nuclear icebreakers of the project 22220, supplementing the algorithm with functionality that ensures an increase in the service life of steam valves by modernizing the electronic digital part of the steam turbine control system.

The proposed suggestions on improving the steam distribution system for serial nuclear icebreakers may be considerably useful in newly designed nuclear icebreaker power plants of the 10510 Leader project, as well as in turbine-generating plants of the actively developing field of nuclear floating power units.

The use of unloaded steam valves in steam distribution systems of turbogenerator installations of nuclear floating power units may pave the way for the use of electromechanical power drives of steam valves in turbine units with the exclusion of hydraulic high-pressure media from the drives.

Keywords: nuclear icebreaker, turbine unit, steam distribution system, electrohydraulic power control system, unification of steam valves, non-metallic composite material, valve stem, perforated sleeve, hydraulic controls, electromechanical servo drive, steam valve life.

For citation: Gulyi V.A., Kondratiev V.V. Some suggestions for improving the steam distribution system of the main turbine unit of the nuclear icebreaker project 22220. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 137 — 147. EDN WRURVX. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

История ледокольного флота СССР и Российской Федерации указывает на то, что длительность сроков эксплуатации атомных ледоколов может достигать нескольких десятков лет, например, ледокол «Таймыр» был принят в эксплуатацию и вошел в состав флота в 1989 г. и до настоящего времени находится в эксплуатации [1].

Следует отметить, что к моменту ввода в эксплуатацию ледоколов агрегаты и механизмы должны быть спроектированы и завершены заводскими и приемо-сдаточными испытаниями, а это означает, что технические решения, реализованные во вступивших в строй ледоколах, могут отставать по уровню от новых решений, которые находятся в непрерывном развитии.

В качестве примера можно привести разработку проекта главных турбоагрегатов ГТА-642 для атомных ледоколов типа «Арктика», которая была выполнена конструкторским бюро Ленинградского Кировского завода в период 1967 — 1973 гг. [2] и легла в основу, с относительно небольшими изменениями, изготовления и комплектации атомных ледоколов второго поколения типа «Арктика» проекта 10520.

Следует отметить, что специфика, сложность и важность гражданского атомного судостроения обусловила необходимость функционирования в составе Российского морского регистра судоходства специального структурного подразделения — Филиала РС по атомным судам, привлечь внимание которого к рассматриваемым вопросам в том числе имеет целью настоящая статья.

Турбоагрегаты атомных ледоколов «Таймыр» и «Вайгач» проекта 10580 в части систем парораспределения существенно отличаются от турбоагрегатов ГТА-642 тем, что укомплектованы паровыми клапанами с системами регулирования и защиты ГТА разработки и поставки немецких компаний Siemens и REXROTH.

После создания турбоагрегатов базового проекта 10520 ко времени начала разработки главного турбогенератора (2013 — 2014 гг.) в составе паротурбинной установки для атомных ледоколов проекта 22220 прошло более 40 лет. В рассматриваемый период в СССР произошли известные политические события, что привело к длительной приостановке поступательного развития судового энергомашиностроения.

Возобновление работ в области создания нового поколения атомных ледоколов для арктического флота Российской Федерации началось с разработки и строительства головного универсального атомного ледокола проекта 22220.

За указанный 40-летний период отсутствия новых разработок турбоагрегатов большая часть специалистов в этой области ушла по естественным причинам, не подготовив молодую смену, и работы пришлось начинать, преодолевая разрыв в научно-техническом развитии энергомашиностроения для атомных ледоколов, организуя и обучая специалистов из других отраслей.

Учитывая положительный опыт эксплуатации атомных ледоколов типа «Арктика» проекта 10520, а также ледоколов «Таймыр» и «Вайгач», в основу новой разработки системы парораспределения турбоагрегатов ледоколов проекта 22220, были заложены базовые конструктивные решения паровых клапанов ГТА-642 атомных ледоколов типа «Арктика» в симбиозе с техническими решениями гидроприводных систем Siemens и REXROTH.

К сегодняшнему дню на основе выполненных новых разработок изготовлено и прошло полный комплекс испытаний энергооборудование, комплектующее первые универсальные атомные ледоколы (УАЛ) проекта 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия», которые уже находятся в эксплуатации. Естественно, что наступило самое интересное время для разработчиков энергооборудования, когда эксплуатационная проверка принятых технических решений показывает возможные инженерные недочеты и дает основу для возвращения к естественному ходу технического развития судовых ледокольных энергоустановок.

Настоящая статья посвящена анализу и определению некоторых перспективных направлений развития и совершенствования очень важной части турбоагрегата главной паротурбинной установки ПТУ-72, устанавливаемой на ледоколы проекта 22220, а именно системы парораспределения и силового электрогидравлического комплекса управления паровыми клапанами турбины.

Проведение анализа конструкции системы парораспределения и комплекса управления клапанами сегодня особенно актуально с точки зрения оптимизации приборного состава и возможности построения комплекса с использованием отечественных комплектующих изделий.

На рис. 1 представлен общий вид паротурбинного агрегата одного борта атомного ледокола проекта 22220 с выделенным фрагментом, касающимся гидроприводной части паровых регулирующих клапанов паровой турбины.

Рассмотрение предложений о возможных направлениях совершенствования системы парораспределения проведем в следующей последовательности:

- 1) рассмотрение конструкции собственно регулирующих паровых клапанов;
- 2) рассмотрение конструкции электрогидравлического силового комплекса управления паровыми клапанами.

1. РАССМОТРЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОБСТВЕННО РЕГУЛИРУЮЩИХ ПАРОВЫХ КЛАПАНОВ И ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ

1.1. Единичные мощности каждого из двух турбоагрегатов составляют:

- на ледоколе проекта 10520 — 27,5 МВт;
- на ледоколе проекта 22220 — 36 МВт.

Указанные единичные мощности весьма близки, но при этом конструкции органов парораспределения ледоколов названных проектов существенно отличаются, в частности:

- на ледоколах проектов 10520 и 10580 предусмотрена подача пара в турбину через один паропровод и один регулирующий клапан, управляемый одним сервомотором с одним комплектом гидроаппаратуры;
- на ледоколе проекта 22220 предусмотрена подача пара в турбину через два паропровода, в каждом из которых установлен свой регулирующий клапан со своим сервомотором и своим комплектом гидроаппаратуры (рис. 1).

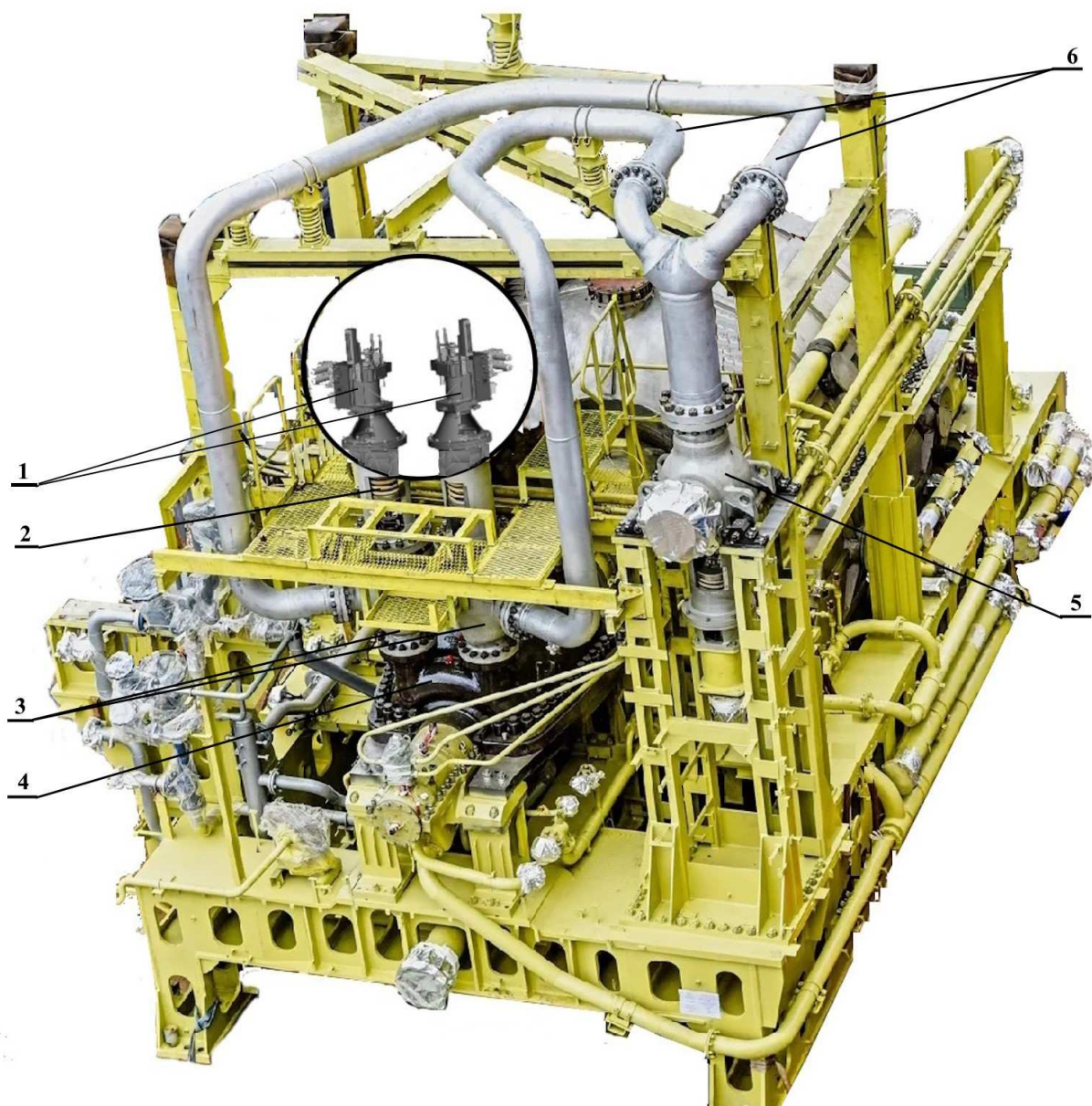


Рис. 1. Общий вид турбоагрегата а/л проекта 22220:

- 1 — гидроприводы регулирующих клапанов; 2 — пружинные блоки регулирующих клапанов;
 3 — регулирующие клапаны; 4 — верхняя половина корпуса ЦВД турбоагрегата; 5 — быстрозапорный клапан;
 6 — трубопроводы подвода пара к регуливающим клапанам

Вызывает вопрос о целесообразности применения на ГТА ледокола проекта 22220 двух подводов пара в турбину. Если разделенному подводу пара в турбину можно найти оправдание в том, что, по мнению разработчика проточной части турбины, обеспечивается большая равномерность распределения пара по лопаткам первой ступени, то напрашивается более рациональное решение двухпоточной подачи пара, но через один регулирующий клапан.

На рис. 2 представлен эскиз компоновки трубопровода подачи пара в турбину с использованием одного парового клапана. При этом очевидно, что в два раза снижается себестоимость системы подачи пара в турбину, исключая двойной комплект регулирующих клапанов 3 и гидроприводов 1 с пружинными блоками 2 (см. рис. 1).

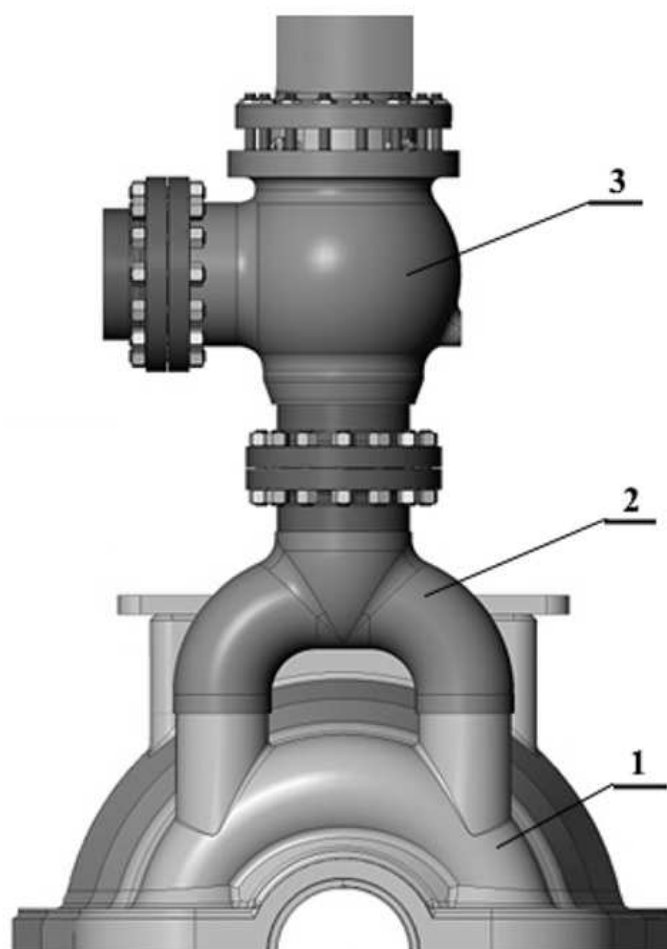


Рис. 2. Эскиз установки регулирующего клапана на верхнюю половину корпуса ЦВД:
1 — верхняя половина корпуса ЦВД турбоагрегата; 2 — двухпоточный паропровод; 3 — регулирующий клапан

Предложение 1.

Рассмотреть вопрос об исключении дублирования паровых клапанов на ГТА перспективных проектов.

1.2. Достойным внимания является техническое решение, примененное в конструкции собственно паровых частей как регулирующих клапанов ГТА, так и клапанов травления избытков пара, возникающих в различных динамических режимах управления движением ледокола.

Использование в системе парораспределения ГТА проекта 22220 перфорированных клапанов с уплотняющими поршневыми кольцами, аналогично ГТА проекту 10520, не вызывает нареканий.

Известны случаи при эксплуатации ледоколов, когда при работе уплотнительных металлических поршневых колец в трущихся металлических парах при перемещении паровых клапанов ГТА случались задиры и заклинивания клапанов.

Было бы интересным и перспективным рассмотреть применение в клапанах неметаллических композитных поршневых колец 5, находящихся в контакте со стенками перфорированных втулок 4 и направляющих втулок 3 штоков клапанов (см. рис. 3).

По опыту создания «сухих» поршневых компрессоров для работы в составе автомобильных газонаполнительных метановых компрессорных станций известно применение в цилиндропоршневых группах газовых поршневых компрессоров флуороновых уплотнений, при том что режим эксплуатации поршневых колец в цилиндрах поршневых компрессоров несравнимо более жесткий по сравнению с работой поршневых колец в регулирующих клапанах ледокольных турбоагрегатов. При разработке паровых клапанов ГТА пр. 22220 была сделана попытка заказать разработку поршневых колец из неметаллического композиционного материала BARS с рабочими температурой до 300 °С и давлением до 100,0 МПа [3] взамен металлических поршневых колец на поршне парового клапана. Однако недостаток времени и ограниченность средств не позволили решить эту задачу.

Предложение 2.

Рассмотреть вопрос применения неметаллических композиционных материалов в конструкции перспективных органов парораспределения турбомашин.

1.3. В паровых клапанах турбоагрегатов, в свое время построенных на Ленинградском Кировском заводе, в том числе ГТА-642 ледоколов типа «Арктика» проекта 10520, традиционно использовалась разгрузка клапанов для уменьшения сил отрыва клапанов от седел из полностью закрытого состояния и движения в сторону открытия.

Это, в частности, объяснялось тем, что давление рабочих сред в гидроцилиндрах управления паровыми клапанами составляло $10 - 12 \text{ кгс/см}^2$, а усилие, которое надо создавать при отрыве клапана от седла, могло составлять до $2,5 - 3 \text{ тс}$.

В паровых клапанах нового ледокола проекта 22220 традиционно предусмотрена их разгрузка, проиллюстрированная на рис. 3 [4].

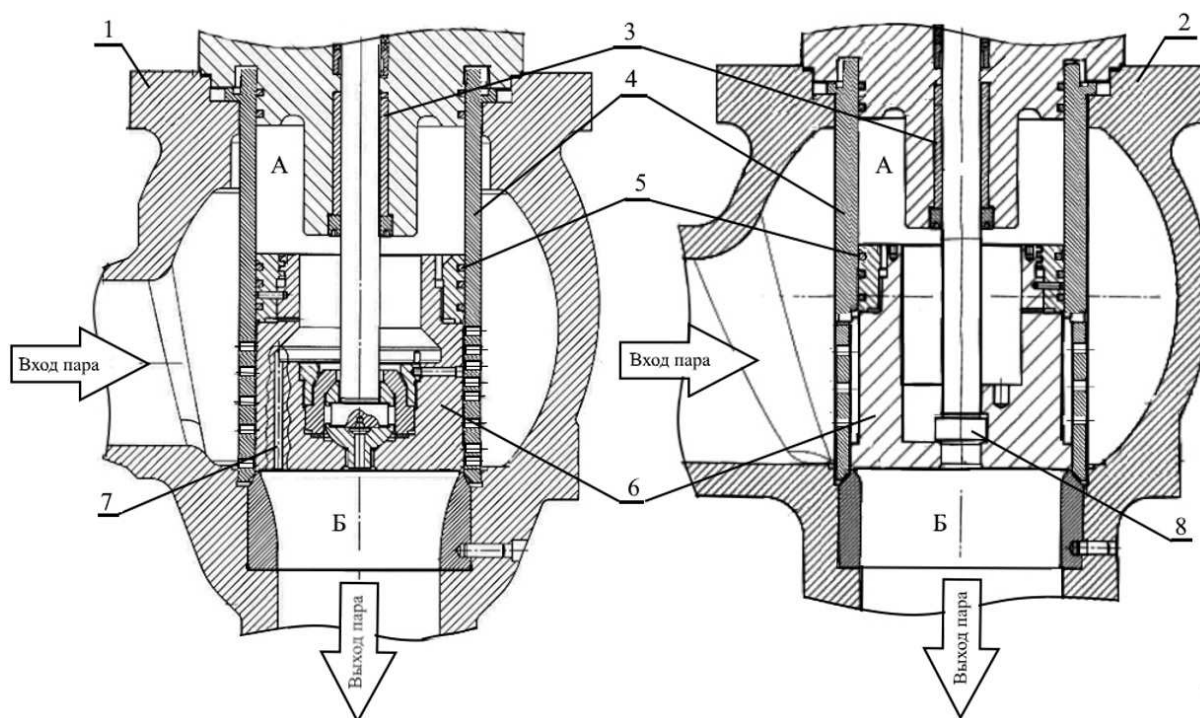


Рис. 3. Общие виды регулирующего клапана и клапана травления ГТА атомного ледокола проекта 22220:

- 1 — регулирующий клапан; 2 — клапан травления; 3 — направляющие втулки штоков;
4 — перфорированные втулки; 5 — поршневые кольца; 6 — поршни клапанов; 7 — разгрузочный паровой канал;
8 — разгрузочный паровой клапан

В клапане травления 2 разгрузка выполнена подобно использованной в ГТА-642 с наличием специального разгрузочного клапана 8, который предварительно открывается в начале (при $3 - 5 \%$ от полного открытия клапана травления) движения клапана травления в сторону открытия, что определяет своего рода «люфт» в месте сочленения штока и поршня клапана.

В регулирующем клапане 1 разгрузка предусмотрена «безлюфтовая» простым наличием канала 7, связывающего полость А перед клапаном и полость Б за клапаном, уравнивая в них давления и снижая усилие отрыва клапана от седла. Опыт эксплуатации подобного регулирующего клапана на всех ледоколах проекта 22220 подтвердил полную работоспособность клапана с разгрузочным каналом.

Из рис. 3 видно, что конструкция регулирующего клапана 1 реализует более гибкую, с элементами самоустановки, стыковку штока и поршня клапана с использованием узла с шаровидной опорой, а также обеспечивает выемку поршня 6 клапана без демонтажа перфорированной втулки 4, что существенно облегчает процесс замены поршневых колец.

Предложение 3.

Провести унификацию паровых клапанов регулирующего и травления с исключением из клапана травления разгрузочного клапана, заменив его каналом разгрузки и конструктивно обеспечив процесс самоустановки поршня на штоке внутри перфорированной втулки.

2. РАССМОТРЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СИЛОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВЫМИ КЛАПАНАМИ

2.1. На ледоколах «Таймыр» и «Вайгач», укомплектованных системой парораспределения разработки компании Siemens с гидросистемой компании REXROTH, разгрузка паровых клапанов не предусматривалась. При этом усилие на паровых клапанах при страгивании может достигать 20 тс [5].

Указанное значение силы потребовало использования в гидроприводах клапанов рабочих сред с давлением около 170 кГс/см^2 , что в ≈ 15 раз больше упомянутых давлений в гидроприводах клапанов ГТА-642.

Следует отметить, что положительный опыт длительной эксплуатации ледоколов «Таймыр» и «Вайгач» определил решение заказчика и разработчика принять на ледоколах проекта 22220 уровень давления рабочей среды в гидросистеме, а также элементную базу электро-гидроаппаратуры в номенклатуре систем компаний Siemens и REXROTH. Однако в гидросистеме управления ГТА ледокола проекта 22220 имеются существенные отличия:

1) полное дублирование гидроприводных каналов управления гидроприводами регулирующего клапана и клапана травления, где используется давление среды 170 кГс/см^2 ;

2) разделение в питающей гидростанции контуров высокого давления (170 кГс/см^2) и низкого давления (14 кГс/см^2) [6];

3) в гидроприводах регулирующего клапана и клапана травления предусмотрено устройство контроля целостности уплотнений гидроцилиндров [7];

4) использование в системе управления быстрозапорным клапаном относительно низкого давления (не более 14 кГс/см^2), что позволило в конструктивных решениях клапана и привода применить отработанную конструкцию клапана ГТА-642 ледоколов проекта 10520 [4];

5) полное дублирование насосных агрегатов питающей гидростанции;

6) учитывая, что на ледоколах проекта 22220 построена единая электроэнергетическая система с существенно более жесткими требованиями к качеству электроэнергии, с целью повышения надежности удержания частоты вращения при возможных аварийных срабатываниях защит турбогенераторов, вызывающих скачкообразную разгрузку турбин, в гидросистеме управления регулирующими клапанами ГТА а/л проекта 22220, в отличие от системы REXROTH, предусмотрен дополнительный контур [8] с дискретными гидроклапанами, обеспечивающий дополнительное закрывающее воздействие на регулирующий клапан при приближении оборотов турбины к значению срабатывания быстрозапорного клапана ГТА.

Быстродействия гидроприводов регулирующего клапана и клапана травления, измеренные в период стендовых испытаний ГТА а/л проекта 22220, составили 0,8 — 1,0 сек при перемещении клапана на полный рабочий ход с максимальной скоростью, что в 2 — 2,5 раза превышает быстродействие гидроприводов системы REXROTH [5].

В итоге имеет место некоторое завышение давлений гидравлической среды в спроектированном и серийно изготавливаемом автономном электрогидравлическом силовом комплексе управления паровыми клапанами ГТА а/л проекта 22220.

Предложение 4.

В перспективных проектах ледоколов рассмотреть возможность уменьшить давление рабочей среды в гидросистеме управления паровыми клапанами ГТА, что заметно снизит требования к элементам гидроуправления и позволит перейти к более простым техническим решениям с переходом на отечественные средства гидроуправления, а возможно — к электромеханическому исполнению сервоприводов управления паровыми клапанами.

2.2. Вернемся к критикуемому в пункте 1.1 техническому решению с двумя регулирующими клапанами, размещенными на турбине, обусловившему избыточность и неэкономичность в изготовлении силового электрогидравлического комплекса в целом.

Если уж неоправданное дублирование органов парораспределения ГТА — регулирующих паровых клапанов — на ледоколах проекта 22220 принято, то было бы целесообразно попытаться оптимизировать алгоритм их использования, а именно увеличить ресурс клапанов, в первую очередь ресурс поршневых колец и перфорированных втулок, которые постоянно находятся в соприкосновении, а при изменениях режимов работы ГТА — в движении друг относительно друга (см. рис. 3, 4-5).

Очевидно, что моторесурсы механизмов управления двумя регулирующими клапанами турбины при синхронном их движении в режимах поддержания заданной частоты вращения турбогенератора используются нерационально.

Гораздо рациональнее было бы организовать работу регулирующих клапанов таким образом, чтобы один из них на разных мощностных режимах турбины фиксировался в разных, но неподвижных положениях, а второй обеспечивал динамические режимы регулирования частоты вращения турбины, сопряженные с непрерывной отработкой изменения нагрузки турбины. По прошествии заданного временного интервала клапаны менялись бы местами с точки зрения режима работы.

Следствием указанного способа управления клапанами является условное «растягивание» суммарного ресурса регулирующих клапанов путем поочередной выработки ресурса каждого из клапанов.

Такое решение было предложено разработчиками системы управления ГТА [9], но, к сожалению, не реализовано в проекте.

На рис. 4 представлена упрощенная схема электрогидравлической системы регулирования турбогенератора, которая позволяет решить названную задачу.

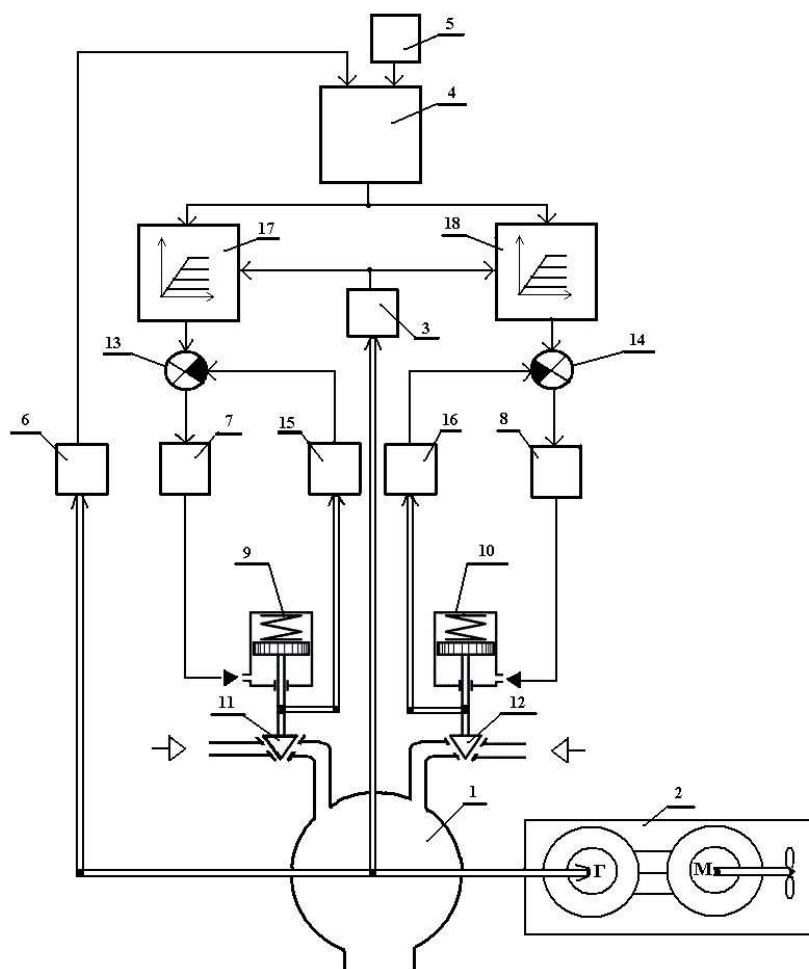


Рис. 4. Схема системы управления регулируемыми клапанами паровой турбины с двумя регулируемыми клапанами:
 1 — паровая турбина; 2 — турбогенераторная гребная электрическая установка; 3 — счетчик моторесурса турбины;
 4 — регулятор частоты вращения; 5 — задатчик частоты вращения; 6 — датчик частоты вращения;
 7 и 8 — электрогидравлические преобразователи; 9 и 10 — силовые гидроприводы; 11 и 12 — регулирующие клапаны;
 13 и 14 — сумматоры сигналов; 15 и 16 — датчики обратных связей; 17 и 18 — программируемые ограничители сигнала

В представленной схеме регулирующие клапаны перемещаются таким образом, что расходы пара через все регулирующие клапаны в сумме обеспечивают мощностной режим турбины. Управление каждым отдельным клапаном с применением своих механизмов управления осуществляют предварительно подсчитав наработку каждого из них в общей наработке турбины и после достижения заранее заданного времени наработки включают в работу последовательно каждый из механизмов управления регулируемыми клапанами турбины.

В эксплуатационном режиме турбина 1 вращает ротор генератора Г, питающего гребной электродвигатель М, приводящий во вращение гребной винт судовой гребной электрической установки 2. При отклонениях фактической частоты вращения ротора турбины 1 от заданной, сформированных сигналами от задатчика 5 и датчика 6 частоты вращения турбины, поступающими на вход регулятора 4, выходной сигнал регулятора 4 воздействует через сумматоры 13 и 14, электрогидравлические преобразователи 7 и 8 на силовые гидроприводы 9 и 10, перемещающие регулирующие клапаны 11 и 12 турбины 1 в новое положение. При этом в сумматорах 13 и 14 происходит компенсация сигналами обратных связей датчиков 15 и 16 выходных сигналов управляемых ограничителей сигналов 17 и 18.

Таким образом, каждому значению выходных сигналов ограничителей 17 и 18 в установившихся режимах работы турбины будет соответствовать определенное положение регулирующих клапанов, при этом суммарный расход пара через оба регулирующих клапана обеспечивает мощный режим турбины.

Сигналы, поступающие на управляющие входы программируемых ограничителей сигналов 17 и 18 от счетчика моторесурса 3, вызывают изменение уровней ограничения сигнала, поступающего на ограничители с выхода регулятора 4 частоты вращения ротора турбины 1.

Причем изменение уровней ограничения в программируемых ограничителях 15 и 16 происходит по-разному.

Например, в первый заранее заданный период времени эксплуатации турбины 1, отсчитываемый счетчиком 3 моторесурса турбины 1, ограничение сигнала от регулятора 4 происходит в ограничителе 17, следствием чего является некоторое прикрытие и фиксация в неподвижном состоянии регулирующего клапана 11. В этом положении обеспечивается сохранение моторесурса собственно клапана 11 и механизма управления регулирующим клапаном 11, включая гидропривод 9, что увеличивает его срок службы и, соответственно, надежность всей системы регулирования и парораспределения паровой турбины.

В рассматриваемой ситуации происходит некоторое снижение частоты вращения ротора турбины 1, уменьшается сигнал с датчика 6 частоты вращения, и регулятор 4 частоты вращения, увеличивая свой выходной сигнал, увеличивает открытие регулирующего клапана 12, выводя частоту вращения ротора турбины 1 на заданное значение, сформированное задатчиком 5.

Таким образом, произошла компенсация недостающего расхода пара через регулирующий клапан 11 за счет увеличения расхода пара через регулирующий клапан 12, который находится в работе и вырабатывает свой моторесурс. Изменение мощностного режима при этом возможно и происходит за счет перемещения только одного регулирующего клапана, а именно 12.

Далее, через заранее заданный отрезок времени, рассчитываемый по результатам счетчика моторесурса 3, в программируемом ограничителе 17 происходит программное изменение уровня ограничения, и регулирующие клапаны 11 и 12 и их гидроприводы 9 и 10 занимают новые положения при неизменном мощностном режиме турбины. При этом зона перемещений клапана 12 сдвинется, что обеспечит более равномерную выработку деталей механизма управления клапанами в местах их соприкосновения и трения.

Аналогичным образом осуществляется работа системы регулирования при включении в работу программируемого ограничителя 18. При этом происходит выработка моторесурса регулирующего клапана 11, а клапан 12 фиксируется в неподвижном состоянии, в котором экономится моторесурс клапана 12 и его механизма управления с гидроприводом 10.

Динамические изменения расходов пара в турбину производят путем воздействия на один из двух механизмов управления регулирующими клапанами: один клапан из двух удерживается в неподвижном состоянии, а второй работает, что определяет изменение во времени зон статических положений гидромеханической и паровой частей парораспределительных органов турбины, при котором более равномерно и в меньшей степени вырабатываются поверхности деталей в местах трения.

Отработка возмущений турбины в установившихся эксплуатационных режимах осуществляется поочередно одним и другим парораспределительным органом при неподвижном соседнем в соответствии с заранее заданным и запрограммированным алгоритмом в программируемых ограничителях. Такая запрограммированная во времени поочередная работа парораспределительных органов турбины позволяет увеличивать их суммарный срок службы.

Предложение 5.

Изменить алгоритм управления регулирующими клапанами турбоагрегатов серийных атомных ледоколов проекта 22220, дополнив алгоритм функционалом, обеспечивающим увеличение ресурса паровых клапанов, осуществив модернизацию электронной цифровой части системы управления техническими средствами без каких-либо изменений в гидромеханической части электрогидравлического силового комплекса управления паровыми клапанами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На сегодняшний день находятся в эксплуатации четыре атомных ледокола проекта 22220 — «Арктика», «Сибирь», «Урал» и «Якутия», закладываются следующие ледоколы этой серии. Вопросы, поднятые в статье, было бы полезным рассмотреть при формировании программы модернизации ледоколов в периоды их заводского ремонта.

2. Рассмотренные в статье предложения по совершенствованию системы парораспределения серийных атомных ледоколов могут оказаться весьма полезными для применения во вновь проектируемых энергетических установках атомного ледокола проекта 10510 «Лидер», а также в турбогенераторных установках активно развивающегося направления создания атомных плавучих энергоблоков.

3. Применение разгруженных паровых клапанов в системах парораспределения турбогенераторных установок атомных плавучих энергоблоков (после проведения измерений усилий на штоках поршней клапанов при начале их движения в сторону открытия, а также во всем эксплуатационном режиме их работы) может открыть дорогу применению электромеханических силовых приводов паровых клапанов в турбоагрегатах с исключением из приводов гидравлических высоконапорных сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турбоагрегаты для атомных ледоколов и подводных лодок. 01.02.2011. [Электронный ресурс] URL: <https://proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=mbghlssni501549432> (дата обращения 03.06.2025).
2. Проект 10580 «Таймыр» и «Вайгач» // История Росатома: Эволюция отрасли: История основных систем: История ледоколов. [Электронный ресурс] URL: <https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-powered-icebreakers/10580/> (дата обращения 03.06.2025).
3. Бессмазочные уплотнения из композиционных материалов группы BARS 700 для работы в условиях высоких давлений. [Электронный ресурс] URL: <https://barrens.ru/pdf/bars700.pdf> (дата обращения 03.06.2025).
4. Гулый В.А. Управление судовыми главными реверсивными паротурбинными агрегатами / В.А. Гулый. — СПб.: Реноме, 2022. — 176 с.
5. Адрианов А.А. Система автоматического управления «Siemens» для главных турбин а/л «Таймыр». Часть I. Регуляторы главных турбин: уч. пос. / А.А. Адрианов, Ю.Г. Татьянченко. — СПб.: Медицинская пресса, 2004.
6. Патент на изобретение № 2670470. Гидросистема управления клапанами паровой турбины: F01D 17/22 (2006.01) RU: заявл. 13.11.2017: опубл. 23.10.2018, БИ № 30 / Гулый В.А., Ильин О.К., Островский В.Г.; заявитель ПКБ «Автоматика».
7. Патент на изобретение № 2675030. Гидропривод: F15B 15/204 (2018.08); F16J 15/56 (2018.08) RU: заявл. от 02.11.2017: опубл. 14.12.2018, БИ № 35 / Григорьев И.И., Гулый В.А., Ильин О.К., Комаров В.А., Матусевич С.И., Кондратьев В.В.; заявитель ПКБ «Автоматика».
8. Патент на изобретение № 2669146. Электрогидравлическая система автоматического регулирования частоты вращения ротора паровой турбины привода электрогенератора судовой гребной электрической установки: F01D 17/22 (2006.01) RU: заявл. от 31.10.2017: опубл. 08.10.2018, БИ № 28 / Гайкова Н.А., Гулый В.А., Ильин О.К., Кашка М.М., Князевский К.Ю., Островский В.Г.; заявитель ПКБ «Автоматика».
9. Патент на изобретение № 2680905. Способ управления регулирующими клапанами паровой турбины ледокольной турбогенераторной гребной электрической установки и устройство для его осуществления: F01D 17/26 (2006.01) RU: заявл. 19.12.2017: опубл. 28.02.2019, БИ № 7 / Васильев О.Л., Гулый В.А., Ильин О.К., Касьянов А.Д., Князевский К.Ю., Комаров В.А., Хаюшко М.В.; заявитель ПКБ «Автоматика».

REFERENCES

1. Turboagregaty dlya atomnykh ledokolov i podvodnykh lodok [Turbine units for nuclear icebreakers and submarines]. URL: <https://proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=mbghlssni501549432> (accessed 03.06.2025).
2. Project 10580 "Taimyr" and "Vaigach". URL: <https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-powered-icebreakers/10580/> (accessed 03.06.2025).
3. Bessmazochnye uplotneniya iz kompozitsionnykh materialov gruppy BARS 700 dlya raboty v usloviyakh vysokikh davlenii [Lubricant-free composite seals from the BARS 700 group for high-pressure applications]. URL: <https://barrens.ru/pdf/bars700.pdf> (accessed 03.06.2025).
4. Guliy V.A. Upravlenie sudovymi glavnymi reversivnymi paroturbinnymi agregatami [Control of ship main reversible steam turbine units]. St. Petersburg: Renome, 2022. 176 p.
5. Adrianov A.A., Tat'yanchenko Yu.G. Sistema avtomaticheskogo upravleniya "Siemens" dlya glavnykh turbin a/l "Taimyr". Chast' I. Regulatory glavnykh turbin [Automatic control system "Siemens" for the main turbines of the nuclear icebreaker "Taimyr". Part I. Main turbine regulators: a study guide]. St. Petersburg: Meditsinskaya pressa, 2004.
6. Gidrosistema upravleniya klapanami parovoi turbiny [Hydraulic control system for steam turbine valves]: Patent for invention No. 2670470, F01D 17/22 (2006.01) RU dated 11.13.2017, publ. on 10.23.2018, bul. No. 30 / Guliy V.A., Il'in O.K., Ostrovskii V.G.; applicant Avtomatika Design Bureau.
7. Gidroprivod [Hydraulic actuating gear]: Patent for invention No. 2675030, F15B 15/204 (2018.08); F16J 15/56 (2018.08) RU dated 02.11.2017, publ. on 14.12.2018, bul. No. 35 / Grigor'ev I.I., Guliy V.A., Il'in O.K., Komarov V.A., Matusevich S.I., Kondratiev V.V.; applicant Avtomatika Design Bureau.

8. Elektrogidravlicheskaya sistema avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrashcheniya rotora parovoi turbiny privoda elektrogenatora sudovoi grebnoi elektricheskoi ustanovki [Electrohydraulic system for automatic speed control of the rotor of a steam turbine for driving an electric generator of a marine rowing electric installation]: Patent for invention No. 2669146, F01D 17/22 (2006.01) RU dated 31.10.2017, publ. on 08.10.2018, bul. No. 28 / Gaikova N.A., Gulyi V.A., Il'in O.K., Kashka M.M., Knyazevskii K.Yu., Ostrovskii V.G.; applicant Avtomatika Design Bureau.
9. Sposob upravleniya reguliruyushchimi klapanami parovoi turbiny ledokol'noi turbogeneratornoi grebnoi elektricheskoi ustanovki i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [A method for controlling the control valves of a steam turbine of an icebreaking turbine generator electric propulsion system and a device for its implementation]: Patent for invention No. 2680905, F01D 17/26 (2006.01) RU dated 19.12.2017, publ. on 28.02.2019, bul. No. 7 / Vasil'ev O.L., Gulyi V.A., Il'in O.K., Kas'yanov A.D., Knyazevskii K.Yu., Komarov V.A., Khayuzko M.V.; applicant Avtomatika Design Bureau.