

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Е. С. Подшивалов¹, О. В. Крюков¹✉, И. В. Гуляев², А. В. Саушев³

¹ООО «ТСН-электро», Россия, 603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7А

²Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
Россия, 430005, г. Саранск, ул. Б. Хмельницкого, 39

³Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
Россия, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

✉o.v.kryukov@mail.ru

В статье описывается процедура системной оценки температуры воздуха газотурбинных компрессоров, работающих на линейных станциях компримирования природного газа газопроводов в южных регионах Российской Федерации.

Анализ статистических данных показывает, что иногда работа рядовых центробежных нагнетателей в летний период не соответствует нормативно-техническим требованиям газовой отрасли и приводит к нарушениям штатной работы энергетических машин и оборудования. Следовательно, предлагается до подачи воздуха в газотурбинные двигатели произвести его охлаждение в специальной системе абсорбционных холодильных машин. Это дополнительно позволит расширить функциональные возможности газотурбинных агрегатов, обеспечивая глубокую очистку воздуха, а также снизить потери давления природного газа, уровня шума и попадания в сам двигатель различных осадков.

Предложена и описана работа оригинальной функциональной схемы устройства, которая гарантирует эффективный воздухозабор атмосферного воздуха для штатной эксплуатации газотурбинных газоперекачивающих агрегатов при работе в летний период в южных регионах страны. Представлены новые результаты экспериментальных исследований параметров охлаждения воздуха в абсорбционных холодильных машинах. Приведен численный пример анализа параметров компрессорных станций с газотурбинными установками на базе ДГ-90/12. Продемонстрированы зависимости мощности газотурбинного двигателя от температуры воздуха и производительности газоперекачивающего агрегата от мощности.

Экспериментальные результаты на компрессорной станции подтвердили предварительные расчеты эффективности нового газотурбинного агрегата с системой охлаждения воздуха, а также доказали необходимость ее установки.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, компрессорная станция, воздухозаборное устройство, абсорбционная холодильная машина, газотурбинная установка, температура воздуха, эффективность

Для цитирования: Подшивалов Е. С., Крюков О. В., Гуляев И. В., Саушев А. В. Анализ эффективности абсорбционных холодильных машин для улучшения показателей газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2026. Т. 10, № 1. С. 57–67. DOI: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-57-67>. EDN: SCERIB.



© Подшивалов Е. С., Крюков О. В., Гуляев И. В., Саушев А. В., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ABSORPTION REFRIGERATION MACHINES FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF GAS TURBINE GAS PUMPING UNITS

E. S. Podshivalov¹, O. V. Kryukov¹✉, I. V. Gulyaev², A. V. Saushev³

¹LLC "TSN-Electro", Elektrovoznaya St., 7A, 603108, Nizhny Novgorod, Russia

²National Research Mordovia State University named after N. P. Ogarev,
B. Khmel'nitsky St., 39, 430005, Saransk, Russia

³Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Dvinskaya St., 5/7, 198035, Saint Petersburg, Russia

✉ o.v.kryukov@mail.ru

The article describes the procedure of the system assessment of air temperature of gas turbine compressors operating at linear stations of natural gas compression of gas pipelines in the southern regions of the Russian Federation.

Analysis of statistical data shows that the operation of a number of centrifugal superchargers in the summer does not meet the regulatory and technical requirements of the gas industry, leading to abnormal operation of power machines and equipment. Therefore, the authors propose to cool the air before it is supplied to the gas turbine engines in a special system of absorption refrigeration machines. This additionally expands the functionality of gas turbine units, providing deep air purification, reducing natural gas pressure loss, preventing the entry of various precipitation into the engine and significantly reducing noise levels.

The article proposes and describes the operation of an original functional scheme that ensures efficient atmospheric air intake for the normal operation of gas turbine gas-pumping units during the summer season in the southern regions of the country. Moreover, the authors present new results of experimental studies of air cooling parameters in absorption refrigeration machines. The article also demonstrates a numerical example of analyzing the parameters of compressor stations with gas turbine units based on DG-90L2.1. The research also presents the dependence of the gas turbine engine power on the air temperature and the dependence of the gas compressor unit performance on the power.

The experimental results at the compressor station confirm the preliminary calculations of the efficiency of the new gas turbine unit with an air cooling system and prove the necessity of its installation.

Keywords: gas compressor unit, compressor station, air intake device, absorption refrigeration machine, gas turbine unit, air temperature, efficiency

For citation: Podshivalov E. S., Kryukov O. V., Gulyaev I. V., Saushev A. V. Analysis of the efficiency of absorption refrigeration machines for improving the performance of gas turbine gas pumping units. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(1):57–67. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-1-57-67>. EDN: SCERIB. (In Russ.).



© Podshivalov E. S., Kryukov O. V., Gulyaev I. V., Saushev A. V., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Развитие современной компрессорной техники большой мощности тесно связано с совершенствованием приводных газотурбинных установок (ГТУ) с целью повышения энергоэффективности, надежности и экологичности их эксплуатации [1, 2]. Это особенно важно обеспечивать на объектах Единой системы газоснабжения Российской Федерации, в том числе на компрессорных станциях (КС) газопроводов, на электростанциях собственных нужд и в системах электроснабжения на базе новых распределительных устройств цифровых подстанций (рис. 1) [3–5].

Однако реальная эксплуатация типовых унифицированных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на КС при повышенных температурах атмосферного воздуха приводит к значительному снижению энергетических характеристик оборудования, на-

рушению штатного режима и снижению ресурса компрессорной техники [6–8]. Следовательно, для сохранения высоких энергетических показателей ГТУ основным техническим направлением исследований стала разработка устройств для охлаждения циклового воздуха перед компрессором ГТУ [2, 9].

Согласно публикациям зарубежных ученых, на Западе широкое использование получила технология STIG (Steam Injected Gas Turbine), обеспечивающая подачу пара во входной патрубке ГТУ [10, 11]. Аналогичные системы впрыска пара с ультратонким распылом имеются в экспериментальных установках отечественных ГТУ, однако они ненадежны и из-за сложности реализации не получили распространения [12, 13]. Альтернативные решения ГТУ также не обосновывают целесообразность их применения.



Рис. 1. Энергокомплекс подстанции с резервированием от газопоршневых генераторов
Fig. 1. Substation energy complex with redundancy from gas piston generators



Рис. 2. Фактическая температура окружающего воздуха в различных точках КС южного региона России
Fig. 2. Actual ambient temperature in various points of the compressor stations in the Russian south regions

Методика анализа характеристик охлаждающего воздуха

При расчете параметров оптимальной работы ГТУ необходимо учитывать статистические данные климатологии конкретного размещения КС [14–16]. Существующие температурные поправки в нормативно-технической документации не в полной мере отражают ситуацию с текущими летними температурами региона, в связи с этим недостатки обоснованы научно. Кроме того, реальная температура атмосферного воздуха в месте размещения КС не является функцией существующих расчетных методик определения параметров необходимого снижения величины температуры воздуха на базе абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин (АБХМ) при дополнительном его охлаждении. В результате энергетические характеристики ГТУ летом всегда будут хуже аналогичных при штатной работе зимой [17, 18].

Как правило температура воздуха на входе ГТУ отличается от температуры окружающей среды из-за особенностей конструкции и монтажа вспомогательного оборудования ГТУ по забору и подаче циклового воздуха, а также расположения блока забора воздуха вблизи выхлопного тракта установки [2, 9]. Подача атмосферного воздуха непосредствен-

но к входному патрубку компрессора ГТУ осуществляется через воздухозаборный тракт (ВЗТ), включающий в себя комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ) с группами фильтров грубой и тонкой очистки, систему антиобледенения/подогрева циклового воздуха, блок шумоглушения и воздуховоды с отводами [2, 9]. ВЗТ обеспечивает подачу необходимого количества очищенного воздуха с минимальными потерями давления, исключает попадание в тракт двигателя атмосферных осадков, обеспечивает снижение шума до санитарных норм (глушение шума, возникающего от работы ГТУ).

Дополнительное повышение температуры циклового воздуха также обусловлено расположением блока забора воздуха в непосредственной близости от агрегатов системы компримирования, выхлопного тракта ГТУ [2, 9]. Это способствует возникновению «вредного» подогрева циклового воздуха ГТУ, возникающего из-за высокой температуры выхлопных газов ГТУ порядка 450–550 °С, незначительного расстояния между системами забора и выхлопа, теплового излучения от поверхности ГПА в процессе их работы [2, 9].

Незначительное расстояние между системой воздухоподдачи и выхлопа в конструкции ГТУ соз-

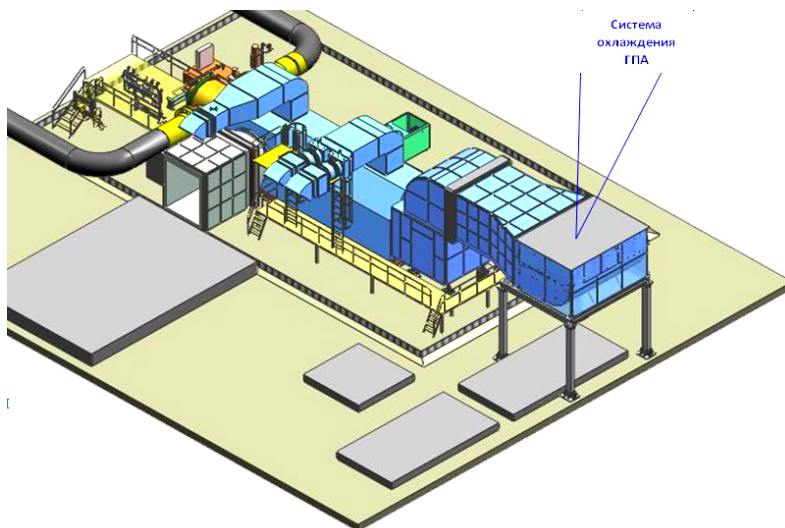


Рис. 3. Расположение системы охлаждения на площадке ГПА
Fig. 3. Location of the cooling system on the gas turbine power plant site



Рис. 4. Общий вид КС «Краснодарская»
на базе 5 агрегатов ГТУ от НПО «Искра»
Fig. 4. General view of the Krasnodarskaya compressor station based on 5 gas turbine units from Iskra

дает так называемое «локальное пятно нагрева» на КС. Величина температуры «вредного» подогрева циклового воздуха из-за наличия «локального пятна нагрева» на КС во многом зависит от циркуляции воздуха на производственной площадке. Опытные замеры на КС показывают, что дополнительный нагрев окружающего воздуха из-за описанных особенностей составляет от 0 до $+8,32^{\circ}\text{C}$ (рис. 2).

Анализ разницы реальной температуры атмосферного воздуха в районе ГТУ и на некотором удалении от КС показал необходимость строгой адаптации всех параметров климатки. Как показала практика эксплуатации, температурная поправка на «вредный» подогрев воздуха зависит от проектного взаимного расположения системы воздухообеспечения и выхлопа ГПА (рис. 3). Для большинства КС, расположенных в южных регионах страны, расстояние между ними составляет 10–12 м, что дает величину температурной поправки на «вредный» подогрев воздуха порядка 5°C [2, 9].

Особенности устройства ВЗТ для ГПА

Как правило, конструкции ГТУ на КС в РФ ранее не имели каких-либо адаптивных охлаждающих систем для летнего периода эксплуатации в условиях критических температур атмосферного воздуха (рис. 4). В настоящее время в монтаж КВОУ предусматривается внедрение разнообразных и оригинальных систем, среди которых можно выделить следующие:

1. На основе эффекта охлаждения атмосферного воздуха в цикловом потоке при испарении воды в пористых водосодержащих материалах на входе в ГТУ на основе принципа работы башенных и вентиляторных градирен (evaporative cooling).

2. Тонкое впрыскивание водяных паров с помощью системы форсунок непосредственно в области патрубков ГТУ по аналогии с водоохлаждающими бассейнами тепловой электростанции.

3. Использование теплообменных систем по принципу аппаратов воздушного охлаждения

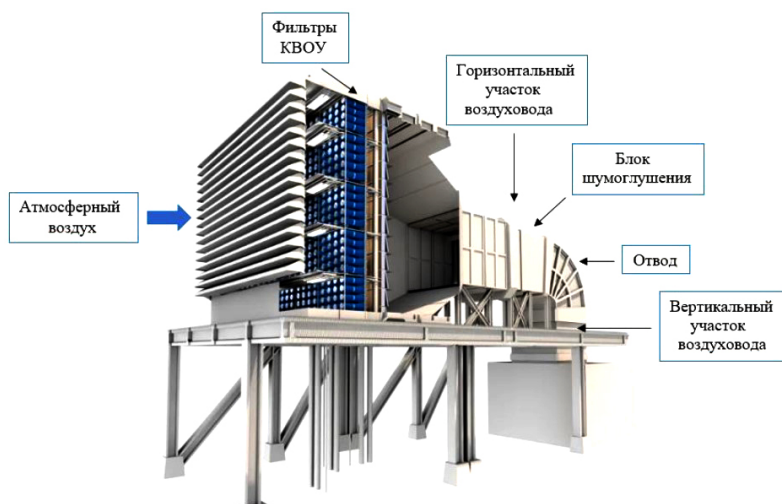


Рис. 5. Типовая схема воздухозаборного устройства ГТУ
Fig. 5. Typical scheme of the air intake device of the gas turbine unit

Таблица 1. Основные характеристики газотурбинных агрегатов серии «Урал»
Table 1. Main features of the Ural series gas turbine units

Характеристика	ГПА-12	ГПА-16	ГПА-25	ГПА-4ПХГ	ГПА-10ПХГ	ГПА-16ДКС	ГПА-10ДКС	ГПА-16ДКС
Номинальная мощность, МВт	12	16	25	4	10	16	10	16
Коммерческая производительность, млн $\text{м}^3/\text{сут}$	20,4–32,6	22–35	44,5–57	1,8–2,5	4–10	6–8,3	5–24	8–29
Давление компрессора, МПа	5,45–9,61	5,45–8,33	7,45	9,92–14,4	9,45–14,7	7,35	12,3	7,45
Степень сжатия	1,32–1,7	1,44–1,61	1,37–1,5	2,2–3	1,57–3,26	1,1–4	1,25–3	1,45–3
Политропный КПД компрессора	0,85	0,85	0,85	0,76–0,8	0,76–0,83	0,8	0,78–0,83	0,78–0,83
Частота вращения компрессора, об/мин	6500	5300	5000	14000	9000	8300	9000	5300
Эффективный КПД ГТУ (стационарный)	0,34	0,363	0,395	0,24	0,34	0,262	0,34	0,363
Частота вращения турбины, об/мин	6500	5300	5000	7000	9000	7000	9000	5300
Удельный расход газа ГТУ, $\text{кг}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$	0,208	0,197	0,177	0,303	0,212	0,274	0,212	0,192
Давление газа, МПа — пускового — топливного	0,6 3,0	0,6 3,2	0,6 4,5	0,6 1,5	0,6 3,0	0,6 1,8	0,6 3,0	0,6 3,2
Тип масла — двигателя — компрессора	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С	МС-8П ТП-22С
Масса, тонн	170	220	310	98	185	147	185	225
Общий ресурс, тыс. час	100	100	100	100	100	100	100	100
Межремонтный ресурс, тыс. час	25	25	25	25	25	25	25	25

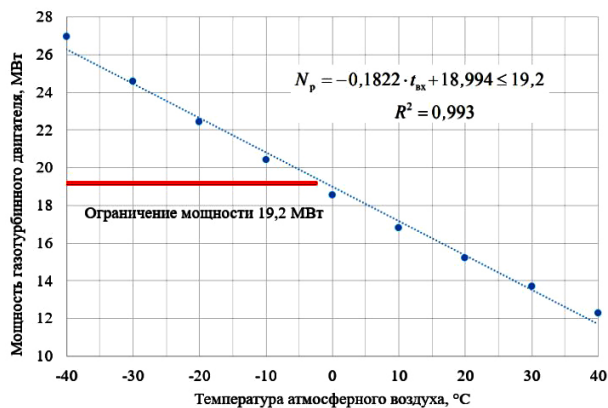
природного газа на КС, по трубам которого пропускается хладагент.

Положительные и энергоэффективные результаты реализации перечисленных выше конструкций КВОУ можно оценить по типовой схеме воздухозаборного аппарата (рис. 5).

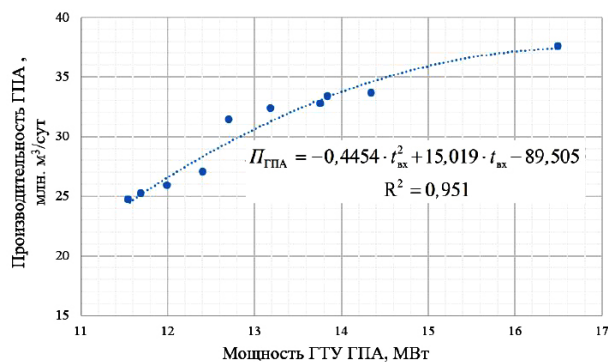
ВЗТ не является серийной продукцией для стационарных ГТУ, что связано с различными климатическими условиями их размещения и эксплуатации, из-за чего могут различаться и конфигурации

ВЗТ для объектов (площадь проходного сечения воздуховода, длина горизонтальных и вертикальных участков, количество отводов и т. д.) [2, 9]. Движение воздуха по каналам ВЗТ сопровождается преодолением местных сопротивлений (фильтры КВОУ и пластины шумоглушителя), что приводит к падению давления и дросселированию.

Потери полного давления на фильтрах КВОУ зависят от степени загрязнения фильтров и возрастают на протяжении их срока службы. По нормам



а)



б)

Рис. 6. Зависимость мощности газотурбинного двигателя ДГ-90Л2.1 N от температуры окружающего воздуха (а) и зависимость производительности Π ГПА от мощности (б)

Fig. 6. Dependence of the power of the DG-90L2.1 N gas turbine engine on the ambient temperature (a) and the dependence of the productivity of Π gas turbine power plants on the power (б)

проектирования потери полного давления КВОУ с шумоглушением не должны превышать 1000 Па. Анализ конструктивных особенностей систем воздухоподдачи ГТУ на КС, расположенных в южных регионах России (см. рис. 4), показал [2, 9], что дополнительный подогрев составляет величину порядка $+8^\circ\text{C}$ по отношению к температуре воздуха окружающей среды.

Исследование параметров дополнительных систем охлаждения циклового воздуха на основе абсорбционных холодильных машин

По аналогии с вентиляторными градирнями, расчет которых подробно рассмотрен авторами в [19, 20], холодильная мощность АБХМ для охлаждения атмосферного воздуха ГПА находится по температуре и его влажности. В соответствии с нормативно-технической документацией, конечной температурой воздуха является проектная точка в $+5^\circ\text{C}$. По характеристикам холодильной машины расходу воды и ее величинам температур на входе и выходе) можно произвести оптимальный выбор той или иной градирни. Так, например, для ГТУ мощностью 16 МВт эти величины составляют около 800 кВт, а при 25 МВт — не более 1000 кВт (табл. 1).

Более подробные зависимости для ГТУ с двигателем ДГ-90Л2.1 получены на компрессорной станции одного из магистральных газопроводов России и представлены на рис. 6. В результате можно констатировать, что рост температуры атмосферного воздуха в данном регионе размещения КС с 15 до 40°C (что реально на КС многих газопроводов юга России) критично влияет на штатную работу ГПА, снижая установленную мощность на четверть от номинала (рис. 6а). Аналитически данная зависимость аппроксимируется линейным графиком, а зависимость производительности ГПА от мощности — квадратичной кривой с проделом в 120 % от номинальной мощности (рис. 6б).

По базе данных экспериментальных замеров получена зависимость производительности ГПА от температуры охлаждающего воздуха в виде квадратичного полинома с точностью $R^2 = 0,9308$ (рис. 7).

В результате расчета, проведенного для агрегата ГПА-Ц-16С, получено значение критерия оценки эффективности при экспортных поставках природного газа $K_{\text{эф2}} = 0,725$, для группы из трех

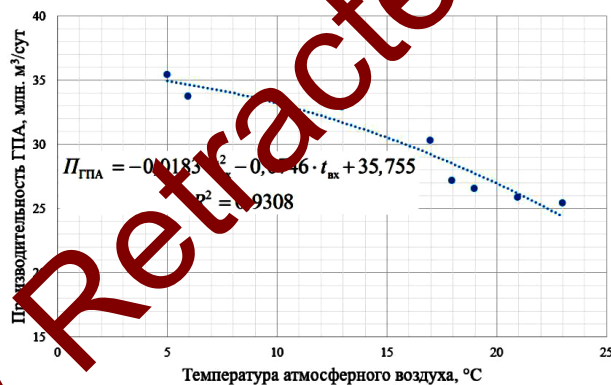


Рис. 7. Зависимость производительности Π ГПА от температуры атмосферного воздуха

Fig. 7. Dependence of the productivity of Π gas turbine power plants on the ambient temperature

ГПА — $K_{\text{эф2, ГПА}} = 0,381$ [2, 9]. Расчетное значение критерия свидетельствует о наличии резерва повышения эффективности, который обусловлен снижением выходных характеристик ГПА вследствие эксплуатации при температурах воздуха, значительно превышающих номинальное проектное значение. Резерв повышения эффективности может быть достигнут при системе с ГПА АБХМ с высокой холодопроизводительностью.

На рис. 8 представлены ранжированные результаты расчета единого критерия эффективности для КС ООО «Газпром трансгаз Волгоград» [2, 9] по степени необходимости установки на них дополнительных систем охлаждения циклового воздуха ГТУ.

Согласно рис. 8 для КС «Котельниковская» характерен один из самых низких показателей эффективности эксплуатации ГТУ ГПА в период повышенных температур окружающей среды.

В ходе проведения экспериментальной проверки эффективности внедренного проекта контроль параметров атмосферного воздуха осуществляется посредством штатных измерительных систем. Аппроксимация экспериментальных данных выполнена методом наименьших квадратов с получением регрессионного уравнения в виде полинома второго порядка. Адекватность принятой математической

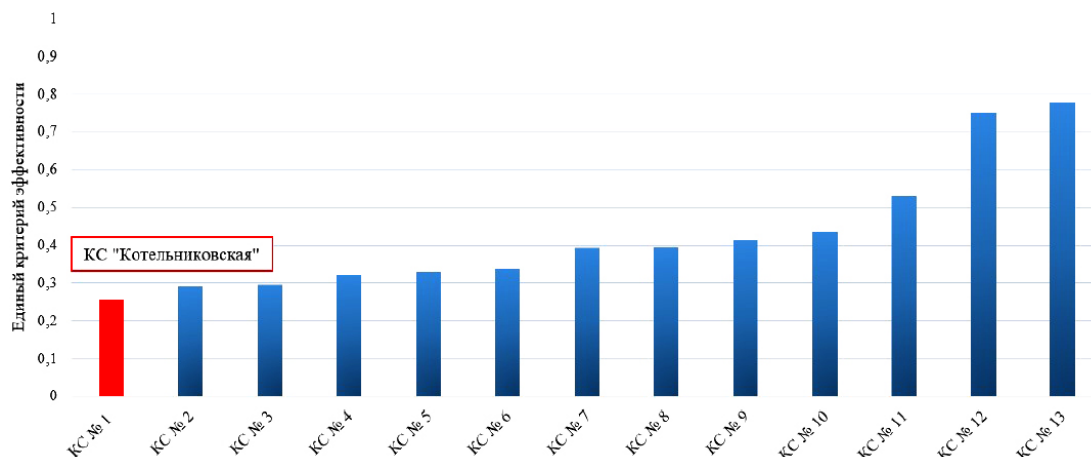


Рис. 8. Результаты расчета единого критерия эффективности газотурбинных ГПА для КС ООО «Газпром трансгаз Волгоград»
Fig. 8. Calculation results of the unified efficiency criterion of gas turbine power plants for Gazprom Transgaz Volgograd

модели оценивалась по критерию Фишера. Полученный полином с высокой точностью (до 2 %) описывает результаты процесса охлаждения воздуха на входном патрубке осевого компрессора (ОК) ГТУ с помощью системы охлаждения на основе АБХМ, реализованного на ПГУ-110 (рис. 9).

Алгоритм общей методики определения значений температуры охлаждения атмосферного воздуха для АБХМ при реконструкции КС

Переход от пилотного проекта внедрения новых систем охлаждения на базе АБХМ на компрессорных станциях магистральных газопроводов южных регионов России путем копирования подходов и параметров для других ГТУ затруднителен, если не сформирован определенный алгоритм, учитывающий конструктивные особенности, рабочие технологические режимы и условия эксплуатации каждого конкретного оборудования газоперекачивающих агрегатов.

Рассмотрим подробнее наиболее важные этапы формирования алгоритма определения требуемых параметров АБХМ:

Первый этап — комплексный анализ исходной информации. Особое внимание следует уделить следующим аспектам:

- анализ всех значений метеорологических параметров площадки КС, включая среднестатистическую температуру воздуха летом и максимистическую ее пики, относительную влажность воздуха, параметры и направления преобладающего ветра, а также месячную периодичность и интенсивность осадков;
- комплекс параметров и текущее состояние (при модернизации) компрессорной установки в соответствии с табл. 1 и все последующие изменения;
- анализ принципиальной возможности включения АБХМ в текущую технологическую схему воздухообеспечения ГТУ с учетом изменений тепловых потоков;
- изучение вариантов размещения на исходной площадке застройки КС нового оборудования АБХМ с учетом взаимовлияния воздушных потоков ветра, а также отходящих газов от ГТУ и аппаратов воздушного охлаждения;
- определение параметров обеспечения системы охлаждения необходимым и достаточным ко-

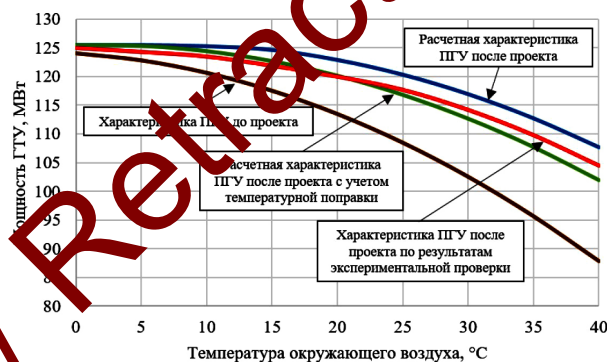


Рис. 9. Сравнение результатов расчетно-теоретических исследований и экспериментальной проверки
Fig. 9. Comparison of the results of theoretical calculations and experimental verification

личеством воды для штатной работы оборудования АБХМ на конкретный ГПА.

Более того, необходимо провести теоретические исследования взаимовлияния основных стохастических параметров климата (температуры, влажности воздуха, скорости ветра и осадков) и технологических режимов КС (производительности, подачи и давления газа) методами корреляционного, ковариационного, дисперсионного и факторного анализа для нахождения наиболее критических соотношений.

Второй этап — определение фактической температуры воздуха на входе в КВОУ с учетом образования локального критического пятна нагрева. Последнее идентифицируется на практике взаиморасположением координат точек входа и выхода тепловых потоков ГТУ и газоперекачивающего агрегата. Поскольку средний локальный перегрев воздуха на КС, расположенных на южных территориях РФ, достигает 5 °C, то и температура воздуха на входе АБХМ составляет величину, большую температуры окружающей среды в данной местности на этот коэффициент.

Третий этап — определение фактической температуры воздуха на входном патрубке компрессора с учетом конструктивных особенностей КВОУ

и АБХМ. При движении по трактам ВЗТ возникает новое приращение температуры потока из-за потерь общего давления, обусловленного силами трения о конструкции. Указанные потери представляют собой сумму небольших потерь в фильтрах очистки и антиобледенительной системе и рассчитываются согласно выражениям термодинамической теории.

Кроме того, на данном этапе предложенного алгоритма можно найти параметры теплового нагрева воздуха в конструктивных элементах АБХМ, для чего находится мощность теплообменных аппаратов по уравнениям теплового баланса с учетом их аэродинамического сопротивления.

Четвертый этап — *определение параметров охлаждения воздуха на базе АБХМ*. На основе синтеза исходных данных (температура воздуха на входном патрубке компрессора, требуемая температура воздуха после охлаждения, относительная влажность, удельная энтальпия и т. д.) производится ориентировочный выбор АБХМ с оптимальным источником тепла для ее работы, выбор открытой испарительной градирни с теплообменными аппаратами и насосными группами.

Чаще всего выбор градирни целесообразно выполнять на основе технических параметров АБХМ, к которым относится расход охлаждающей воды, ее начальная и конечная температура. Поскольку в каждой градирне существуют потери воды на испарение и продувку, необходимо предусмотреть систему подачи питающей воды из независимого источника. Выбор насосных групп производится по расходу воды через АБХМ и теплообменный аппарат, а также по гидравлическому сопротивлению циркуляционного контура. Поддержание расчетной температуры охлаждающей воды АБХМ осуществляется посредством частотного регулирования производительности вентиляторов градирни и байпасирования части потока оборотной воды.

Пятый этап — *определение наиболее оптимального конструктивного решения по организации всей системы охлаждения*. Производится выбор агрегатной системы охлаждения, системы охлаждения на группу ГПА и общецеховой системы охлаждения КС. В качестве воздухоохладителей для КС целесообразно использовать кожухотрубные теплообменники как наиболее простые и надежные в эксплуатации. Для оптимизации дополнительной системы охлаждения циклового воздуха на основе АБХМ и интенсификации теплообмена в перспективе могут быть применены теплообменники нового поколения с усовершенствованными конструкциями.

Анализ результатов позволяет констатировать, что полученные в соответствии с приведенным выше алгоритмом температурные поправки к температуре циклового воздуха влияют на подбор холодильной машины для системы охлаждения, включающей одну АБХМ, установленную на группу из двух газоперекачивающих агрегатов КС. При невозможности интеграции в КВОУ теплообменника требуемой площади целесообразно (для сокращения площади поверхности и приведения теплообменного аппарата к оптимальным массогабаритным характеристикам) задействовать резервы повышения его эффективности за счет использования технических решений по интенсификации теплообмена, а также реализовать схему движения теплоносителей, максимально близкую к противоточной. При проектировании систем охлаждения на основе АБХМ необходимо учитывать требования завода-изготовителя по размещению оборудования

в отапливаемых закрытых помещениях с температурой воздуха от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью не более 80 %.

Использование данной методики и предложенного алгоритма расчета позволяет обеспечить внедрение дополнительной системы охлаждения циклового воздуха на основе АБХМ, максимально отвечающей требованиям условий эксплуатации ГТУ.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о необходимости внедрения на всех аналогичных КС дополнительной системы охлаждения циклового воздуха ГТУ на основе АБХМ.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных и технико-технологических исследований по анализу влияния реальной температуры атмосферного воздуха на процесс охлаждения и применения энергетических показателей ГПА свидетельствуют о значительных потерях давления ГТУ во всех элементах ВЗТ. Предложены расчетные технические мероприятия по значениям температурной поправки агрегатов, установленным на КС в южных регионах России, и в частности по производственной площадке КС «Котельниковская», с учетом конфигурации воздухообеспечения ГТУ.

Рассмотрены наиболее рациональные варианты использования систем абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин для охлаждения воздуха. Особое внимание уделено ключевому элементу системы воздухообеспечения — вентиляторным градирням, которые серийно выпускаются и широко используются во всевозможных водооборотных системах производственных предприятий ТЭК.

Рассмотрены энергетические критерии анализа энергоэффективности ГТУ для отечественных, региональных и экспортных поставок газа по магистральным газопроводам «Голубой поток», «Турецкий поток» и «Краснодарский край — Крым». Построены ранжированные ряды и проведена сравнительная оценка эффективности всех КС ПАО «Газпром», находящихся в южных регионах РФ и функционирующих в условиях повышенных температур. На основе единого критерия эффективности подтверждена целесообразность установки дополнительной системы охлаждения циклового воздуха ГТУ на основе АБХМ на ГПА-Ц-16С в составе КС «Котельниковская» ООО «Газпром трансгаз Волгоград».

Список источников / References

1. Касьяненко А. А., Евдокимов А. Н. Оптимизация системы технического обслуживания при эксплуатации газотурбинной установки // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. № 2. С. 25–28. EDN: VLRJVP.
2. Kasyanenko A. A., Evdokimov A. N. Optimization of the system technical maintenance when operating gas turbine plant. *Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*. 2016;2:25–28. EDN: VLRJVP. (In Russ.).
3. Игнатова Т. В. Разработка методического подхода к применению холодильных машин для повышения эффективности ГПА: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2024. 186 с. EDN: VPIXJP.
4. Ignatova T. V. Razrabotka metodicheskogo podkhoda k primeneniyu kholodil'nykh mashin dlya povysheniya ehffektivnosti GPA. Moscow, 2024. 186 p. EDN: VPIXJP. (In Russ.).

3. Копылов С. Н., Казаков А. В., Бухтояров Д. В., Смирнов Н. В. Новые нормативные требования к распределительным устройствам установок газового пожаротушения // Пожарная безопасность. 2020. № 2 (99). С. 36–40. <https://doi.org/10.37657/vniipo.2020.99.2.003>. EDN: KLSJBR.
- Kopylov S. N., Kazakov A. V., Bukhtoyarov D. V., Smirnov N. V. New regulatory requirements for selector valves of gas fire extinguishing systems. *Fire Safety*. 2020;2(99):36–40. <https://doi.org/10.37657/vniipo.2020.99.2.003>. EDN: KLSJBR. (In Russ.).
4. Степанов С. Е., Васенин А. Б., Кононенко А. Б. [и др.]. Интеллектуальные функции системы управления и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2022. № 5 (154). С. 4–13. EDN: OKUBRS.
- Stepanov S. E., Vasenin A. B., Kononenko A. B. [et al.]. Intelligent functions of the control and monitoring systems of switchgears KTP "Kaskad". *Avtomatizatsiya i IT v Energetike*. 2022;5(154):4–13. EDN: OKUBRS. (In Russ.).
5. Васенин А. Б., Степанов С. Е., Крюков О. В. Блочномодульные КТП-10/0,4 с функциями цифровой подстанции для арктических объектов ПАО «ГАЗПРОМ» // Наука и техника в газовой промышленности. 2023. № 2 (94). С. 9–18. EDN: TWYZSD.
- Vasenin A. B., Stepanov S. E., Kryukov O. V. Blochnomodul'nyye KTP-10/0,4 s funktsiyami tsifrovoy podstantsii dlya arkticheskikh ob'yektov PAO "GAZPROM". *Science & Technology in the Gas Industry*. 2023;2(94):9–18. EDN: TWYZSD. (In Russ.).
6. Будаков И. В., Скирта С. М., Михеев П. Г. [и др.]. Внешние причины изменения ресурса двигателя ГТД-110 // Турбины и дизели. 2025. № 5 (122). С. 62–66. EDN: ZCJFH.
- Budakov I. V., Skirta S. M., Mikheev P. G. [et al.]. External causes of resource changes of the GTD-110 engine. *Turbines & Diesel*. 2025;5(122):62–66. EDN: ZCJFH. (In Russ.).
7. Буров В. Д., Макаркин Ю. А. Влияние эффективности воздушных фильтров на эксплуатационные характеристики ГТУ // Состояние и перспективы развития электро- и теплоэнергетических технологий (XXIII Бенардосовские чтения): материалы МПТ. Иваново, 2025. С. 34–36. EDN: YXQVRT.
- Burov V. D., Makarkin Yu. A. The influence of air filter efficiency on the performance of gas turbines. *State and Prospects of Development of Electrical and Thermal Technology (XXIII Benardos Readings)*. Ivanovo, 2025. P. 34–36. EDN: YXQVRT. (In Russ.).
8. Аистов И. П., Свищёв А. В. Перспективное насосное оборудование для компрессорных и технологических установок нефтехимических производств // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 44–47. EDN: LQMLAT.
- Aistov I. P., Svishchev A. V. Prospective pumping equipment and compressor units of petrochemical plants. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014;3(133):44–47. EDN: LQMLAT. (In Russ.).
9. Игнатова Т. В., Житомирский Б. Л. Методика определения температуры воздуха на входном патрубке осевого компрессора газотурбинной установки // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. 2024. № 1 (314). С. 81–97. EDN: BYHZDN.
- Ignatova T. V., Zhitomirsky B. L. Methodology of determining air temperature at inlet branch pipe of axial compressor of gas turbine plant. *Proceedings of Gubkin University*. 2024;1(314):81–97. EDN: BYHZDN. (In Russ.).
10. Юрков С. В., Филиппова В. М. Оптимизация параметров комбинированной парогазовой установки на базе водородной STIG-технологии ГТУ // Балтийский морской форум: материалы IX Международного Балтийского морского форума. Калининград, 2021. С. 316–327. EDN: UGYGUW.
- Yurkov S. V., Filippova V. M. Optimization of parameters of a combined steam and gas plant based on hydrogen STIG technology of a gas turbine plant. *Baltic Maritime Forum*. Kaliningrad, 2021. P. 316–327. EDN: UGYGUW. (In Russ.).
11. Даниленко А. С., Пожарицкий А. Э., Юрков С. В. Оптимизация параметров рабочего процесса газотурбинной установки с технологией STIG на базе тепловой диаграммы рабочего тела сложного состава // Вестник молодежной науки. 2017. № 4 (11). С. 18. EDN: ZWKWQJ.
- Danilenko A. S., Pozharitskiy A. E., Yurkov S. V. Optimization of turbine operation of gas turbine with STIG technology on the basis of thermal diagram of complex working mass. *Vestnik Molodezhnoy Nauki*. 2017;4(11):18. EDN: ZWKWQJ. (In Russ.).
12. Стенников В. А., Жарков С. В. Эффективные направления технической политики в энергоснабжении // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 5. С. 19–31. EDN: ZMQFFV.
- Stennikov V. A., Zharkov S. V. Effective lines of technical policy on energy supply. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika*. 2017;5:19–31. EDN: ZMQFFV. (In Russ.).
13. Олейниченко В. Г. Технологические схемы газоиспользующих установок // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 23 (163). С. 53–59. EDN: TEUXXP.
- Oleynichenko V. G. Technological schemes of gas-powered plants. *Alternative Energy and Ecology*. 2014;23(163):53–59. EDN: TEUXXP. (In Russ.).
14. Бычков Е. В. Стабилизация температурных режимов производственно-эксплуатационных помещений компрессорных станций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 2. С. 10–19. <https://doi.org/10.25791/pribor.02.2019.46>. EDN: YWKVAD.
- Bychkov E. V. Stabilization of temperature modes of industrial-operational premises of compressor stations. *Instruments and Systems. Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2019;2:10–19. <https://doi.org/10.25791/pribor.02.2019.46>. EDN: YWKVAD. (In Russ.).
15. Васенин А. Б., Степанов С. Е., Крюков О. В. Система интеллектуального мониторинга состояния магистрального газопровода «Сахалин-Хабаровск-Владивосток» // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2019. № 2 (36). С. 40–53. EDN: ZSGOUX.
- Vasenin A. B., Stepanov S. E., Kryukov O. V. Intelligent monitoring system conditions of the main gas pipeline Sakhalin-Khabarovsk-Vladivostok. *Avtomatizatsiya i IT v Energetike*. 2019;2(36):40–53. EDN: ZSGOUX. (In Russ.).
16. Бычков Е. В. Оптимизация температурных режимов производственно-эксплуатационных помещений компрессорных станций // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. 2018. № 4 (34). С. 32–41. EDN: YQNEXB.
- Bychkov E. V. Optimization of temperature modes production-operational premises of compressor stations. *Avtomatizatsiya i IT v Energetike*. 2018;4(34):32–41. EDN: YQNEXB. (In Russ.).
17. Мещерин И. В., Хлыбов Н. В. Повышение эффективности каскадного цикла сжижения природного газа в арктических условиях // Газовая промышленность. 2022. № 2 (828). С. 94–104. EDN: JMEEZO.
- Meshcherin I. V., Khlybov N. V. Efficiency increasing of the cascade cycle of natural gas liquefaction under the Arctic conditions. *Gazovaya Promyshlennost'*. 2022;2(828):94–104. EDN: JMEEZO. (In Russ.).
18. Закиров Д. Г., Рыбин А. А. Использование низкпотенциальной теплоты: моногр. М.: Русайнс, 2015. 158 с. ISBN 978-5-4365-0591-6. EDN: TJCWHO.
- Zakirov D. G., Rybin A. A. Ispol'zovaniye nizkopotentsial'noy teploty. Moscow, 2015. 158 p. ISBN 978-5-4365-0591-6. EDN: TJCWHO. (In Russ.).
19. Киянов Н. В., Крюков О. В., Прибытков Д. Н., Горбатюшков А. В. Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градиентами // Электротехника. 2007. № 11. С. 62–68. EDN: KZXBCN.

Kiyarov N. V., Kryukov O. V., Pribytkov D. N., Gorbatushkov A. V. A concept for the development of invariant automated electric drives for water recycling systems with fan cooling towers. *Russian Electrical Engineering*. 2007;11:62–68. EDN: KZXBCN. (In Russ.).

20. Крюков О. В., Киянов Н. В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: моногр. Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2007. 258 с. ISBN 978-5-93272-478-1. EDN: QNNEAD.

Kryukov O. V., Kiyarov N. V. Elektrooborudovaniye i avtomatizatsiya vodooborotnykh sistem predpriyatiy s ventilyatornymi gradirnyami. Nizhny Novgorod, 2007. 258 p. ISBN 978-5-93272-478-1. EDN: QNNEAD. (In Russ.).

Вклад авторов:

Е. С. Подшивалов. Проведение обзора существующих абсорбционных холодильных машин для улучшения показателей газотурбинных газоперекачивающих агрегатов, определение их преимуществ при использовании на компрессорных станциях.

О. В. Крюков. Постановка целей и задач исследования, расчет параметров охлаждения воздуха в турбокомпрессорных установках, формулирование выводов, подготовка текста статьи, рисунков и списка используемой литературы.

И. В. Гуляев. Анализ состояния вопроса, оценка результатов разработанной методики расчета и составленного на ее основе алгоритма общей методики определения значений температуры охлаждения атмосферного воздуха для АБХМ при реконструкции компрессорных станций.

А. В. Саушев. Разработка методики анализа характеристик охлаждающего воздуха, исследование параметров дополнительных систем охлаждения циклового воздуха на основе абсорбционных холодильных машин, конкретизация наиболее важных этапов формирования алгоритма оценки требуемых параметров АБХМ.

Authors' contribution:

Egor S. Podshivalov. Conducting a review of existing absorption refrigerating machines to improve the performance of gas turbine gas pumping units, determining their advantages when used at compressor stations.

Oleg V. Kryukov. Setting the goals and objectives of the study, calculating the parameters of air cooling in turbocharger installations, formulating conclusions, preparing the text of the article, drawings and a list of references.

Igor V. Gulyaev. Analysis of the issue status, evaluation of the results of the developed calculation methodology and the algorithm based on it for the general methodology for determining the ambient air cooling temperature values for ABCM during the reconstruction of compressor stations.

Alexander V. Saushev. Development of a methodology for analyzing the characteristics of cooling air, investigation of the parameters of additional cyclic air cooling systems based on absorption refrigerating machines, specification of the most important stages in the formation of an algorithm for estimating the required parameters of ABCM.

Информация об авторах:

ПОДШИВАЛОВ Егор Сергеевич, технико-коммерческий инженер ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород; аспирант кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государствен-

ного инженерно-экономического университета, г. Княгинино.

SPIN-код: 9115-8086

AuthorID (РИНЦ): 1173793

e-mail: e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru

КРЮКОВ Олег Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), заместитель директора по науке ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 9406-6475

AuthorID (РИНЦ): 498607

ORCID: 0000-0002-5682-1946

e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

ГУЛЯЕВ Игорь Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), руководитель НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания» Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, г. Саранск.

SPIN-код: 7203-6720

AuthorID (РИНЦ): 40902

e-mail: ivgulyaev@mail.ru

САУШЕВ Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), ведущий кафедрой «Электропривод и электрооборудование береговых установок» государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 9692-8403

AuthorID (РИНЦ): 134520

e-mail: saushew@sfed.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 06.02.2026; одобрена после рецензирования 04.03.2026; принята к публикации 20.03.2026.

Information about the authors:

PODSHIVALOV Egor Sergeevich, Technical and Commercial Engineer, LLC "TSN-Electro", Nizhny Novgorod; Postgraduate of the Electrification and Automation Department, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino.

SPIN-code: 9115-8086

AuthorID (RSCI): 1173793

e-mail: e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru

KRYUKOV Oleg Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of Science, LLC "TSN-Electro", Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 9406-6475

AuthorID (RSCI): 498607

ORCID: 0000-0002-5682-1946

e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

GULYAEV Igor Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Energy Efficient and Dual Power Engines Department, National Research Mordovia State University named after N. P. Ogarev, Saransk.

SPIN-code: 7203-6720

AuthorID (RSCI): 40902

e-mail: ivgulyaev@mail.ru

SAUSHEV Alexander Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations Department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg.

SPIN-code: 9692-8603
AuthorID (RSCI): 634520
e-mail: saushev@bk.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The article was submitted 06.02.2026; approved after reviewing 04.03.2026; accepted for publication 20.03.2026.

Отозвана / Retracted