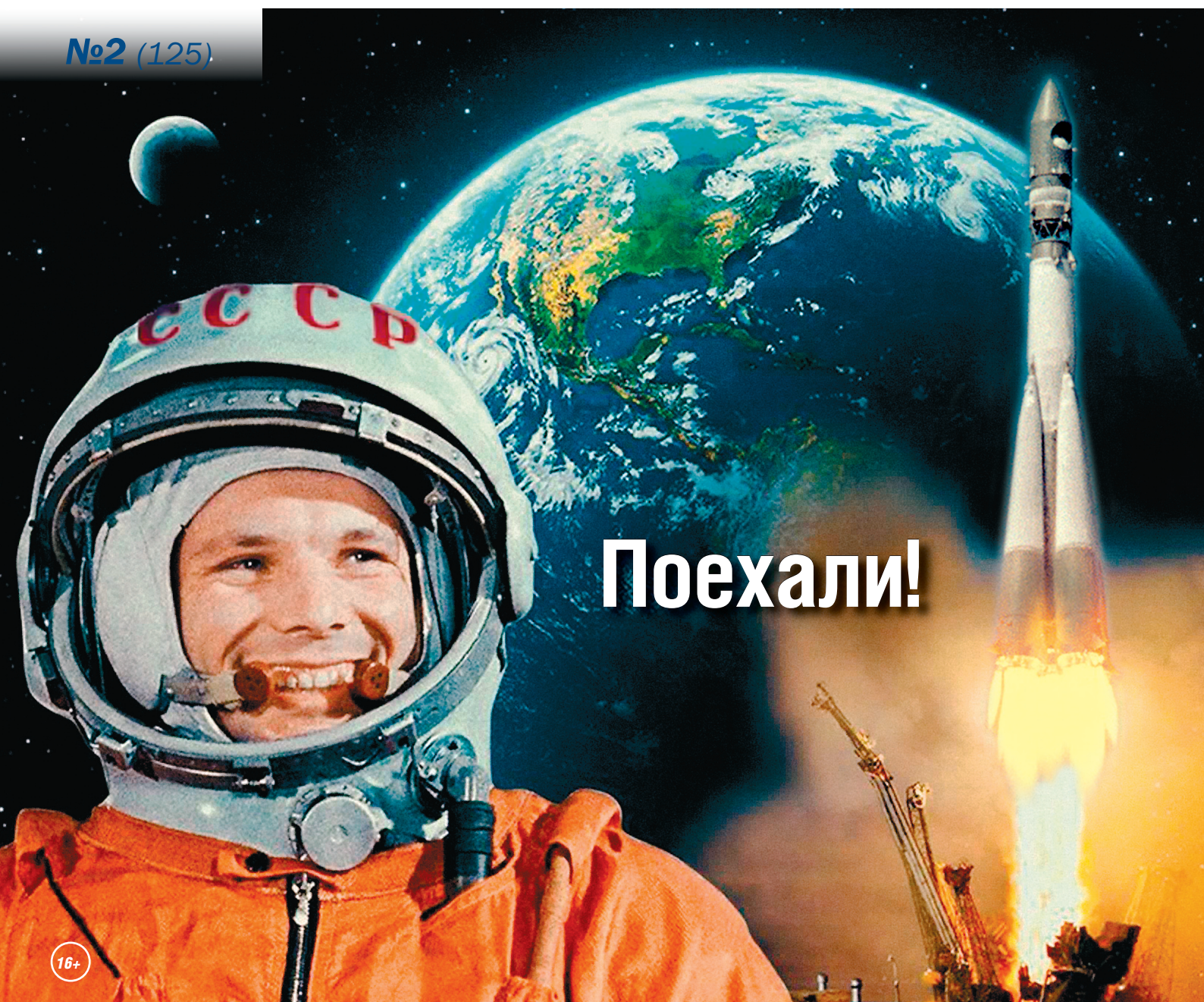


март
апрель
2026

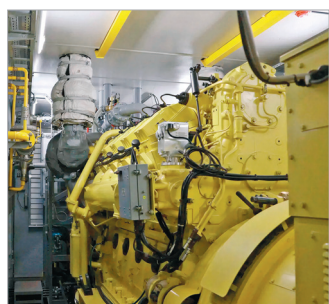
Турбины и Дизели

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№2 (125)



Поехали!



Газодизельные энергоблоки «ТМХ»
установят на острове Шикотан

Ремонт шраудов турбины 9FA
выполнила компания «РОТЕК КМ»

Сравнительный анализ эффективности отечественных технологических турбокомпрессорных агрегатов для УКЛ-7

Г. Б. Уфлянд, С. Л. Шамеко (к.т.н.) – ООО «ТурбоРеф Инжиниринг»

Эффективность технологических турбокомпрессорных агрегатов (ТТКА) для производства азотной кислоты в основном определяется расходом воздуха на технологию и удельными затратами на его сжатие и прокачку. При этом эффективность ТТКА непосредственно связана с параметрами и конкретным состоянием технологической линии.

In brief

A comparative analysis of the performance of domestic turbocharger units for the UKL-7

The efficiency of process turbocharger units (PTUs) is primarily determined by the air flow rate required for the process and the specific costs of compressing and pumping the air.

At the same time, the efficiency of PTUs is also directly linked to the parameters and specific condition of the process line.

Years of development, refinement, and the accumulation of operational and maintenance experience with the GTT-3-type TTKA (developed by NZL), as well as a significant modernization of the UKL-7 technology, along with the elimination of obvious defects, led to adaptations that allowed leading manufacturers to achieve a significant increase in design capacity, energy efficiency, and equipment reliability despite the turbocharger's complex thermal scheme.



Перспективы развития отечественных ТТКА для производства азотной кислоты ранее системно анализировались ведущими специалистами отрасли. Так, в докладе ОАО «ГИАП» [1] было представлено положение дел в крупнотоннажном производстве азотной кислоты, сложившееся к 2014 году, а также изложена стратегия дальнейшей модернизации линий УКЛ-7, в том числе «на базе новых полнопорных воздушных компрессоров с повышением давления сжатого воздуха от 7,3 до 7,8...8,0 кгс/см² с целью достижения часовой производительности не менее 16,5...17 т/ч HNO₃...» (табл.).

Многолетнее освоение, доводка, накопление опыта эксплуатации и ремонта ТТКА типа ГТТ-3 (разработка НЗЛ), а также существенная модернизация технологии УКЛ-7 [1], наряду с устранением явных дефектов, привели к адаптации, что позволило на передовых производствах достичь значительного увеличения проектной производительности, энергоэффективности и надежности оборудования несмотря на усложненную тепловую схему турбокомпрессора. Много было сделано после 1977 года в ходе освоения серийной модернизированной установки ГТТ-3М (производство АО «Дальэнергомаш») [2].

При этом даже после ввода в эксплуатацию крупнотоннажных агрегатов АК-72 удельная себестоимость и энергоемкость азотной кислоты, вырабатываемой УКЛ-7, остаются самыми низкими [2].

Важно отметить, что усложненная тепловая схема ГТТ-3 (ГТТ-3М), основанная на промежуточном охлаждении воздуха в процессе сжатия, обоснованно использовалась разработчиками несмотря на неизбежные недостатки при эксплуатации [2], так как она обладает энергетическими преимуществами в сравнении с т.н. полнопорными ТТКА (ГТТ-3ПН, ГТУ-8, Astra 7,5/29, ГТТ-9). Известно, что промежуточное охлаждение при сжатии, в зависимости от конкретных параметров ТТКА, позволяет экономить до 20 % потребной мощности привода на единицу расхода [3, 4].

Для указанных выше агрегатов выполнено сравнение удельной потребной мощности сжатия воздуха. В расчетах энергоэффективности использовались проектные данные и/или отдельные фактические параметры ТТКА на режимах работы, близких к номинальным [2, 5, 6, 7]. Данное сравнение энергоэффективности различных ТТКА может быть лишь оценочным, поскольку показатели эффективности напрямую зависят от «пропускной способности» технологических трактов и общего состояния конкретного агрегата УКЛ-7.

Оценочный расчет потребной мощности сжатия в компрессорах производился на основе массового расхода воздуха через компрессор, отношения давлений и адиабатного КПД. При этом значения адиабатных КПД компрессоров («по патрубкам») для агрегатов ГТТ-3М и головных агрегатов ГТТ-3ПН и ГТУ-8 оценивались по измеренным значениям давлений (отношения давлений) и температур воздуха на входе и выходе.

Расчет потребной мощности для сжатия компрессорной группы ГТТ-3М выполнен с учетом потерь в редукторе. Весьма незначительные затраты энергии на прокачку охлаждающей воды в системе промежуточного охлаждения ГТТ-3М для упрощения не учитывались. При необходимости эти затраты можно учесть.

Также выполнена оценка показателей эффективности для головного агрегата ГТУ-8 в составе штатной УКЛ-7 и серийного агрегата – в составе адресно модернизированной линии УКЛ-7. В расчетах энергоэффективности для головного агрегата ГТУ-8 использованы данные из [5], для серийных агрегатов – осредненные параметры в эксплуатации.

Согласно [6, 7], ГТТ-9 разработана как прямая замена ГТТ-3М, позволяющая модернизировать существующие линии УКЛ-7 с минимальными доработками. В проекте ГТТ-9 заложено регулирование расхода воздуха в широком диапазоне (80...105 %). Ниже представлены оценочные расчеты энергоэффективности ГТТ-9 для двух крайних вариантов производительности на технологию. При этом в зависимости от варианта комплектации (со штатной или

доработанной линией УКЛ-7) проектные значения КПД «по патрубкам» у компрессора и турбины были экспертно откорректированы с учетом изменения производительности и степени сжатия при сохранении габаритов исходного корпуса и патрубков турбокомпрессора.

Исходные данные и результаты оценочных расчетов показателей энергоэффективности компрессорных секций ГТТ-3М, а также полнонапорных компрессоров ГТУ-8, ГТТ-3ПН и ГТТ-9, полученные на основе анализа проектных и/или фактических параметров, сведены в табл. Из данных таблицы следует, что для ГТТ-3М удельные затраты энергии на сжатие каждой тонны воздуха на технологию минимальны. Значительно хуже (примерно в 1,5 раза) этот показатель у ГТТ-3ПН и у головного агрегата ГТУ-8 (+24 %), далее следуют ГТТ-9 и серийный агрегат ГТУ-8 (+14...15 %). Несколько иная картина получена по затратам природного газа на каждую тонну расхода воздуха в технологию.

Очевидно, что разработка, доводка и серийное производство специализированного ТТКА является сложной технической задачей. Поэтому из упомянутых в [1] полнонапорных агрегатов лишь ГТУ-8 (разработка группы НПО «Зоря-Машпроект») к настоящему времени (и не без проблем) смог занять определенную «нишу» в отрасли. Данный относительный успех объясняется как профессиональной конструкцией основных узлов ГТУ-8, так и корректным заданием проектных параметров и показателей эффективности, наряду с адресной модернизацией технологии УКЛ-7 под серийные агрегаты. В результате, однако, фактическая производительность ТТКА ГТУ-8, как и большинство показателей эффективности, лишь незначительно превосходит значения, достигнутые на отдельных агрегатах ГТТ-3М.

Головные образцы других полнонапорных ТТКА (ГТТ-3ПН, Astra 7,5/29) довести не удалось, в основном по причине серьезных конструкторских недоработок на фоне «неувязки» проектных и фактических материально-энергетических балансов. Дело в том, что с увеличением отношения давлений и производительности по воздуху в полнонапорных ТТКА непропорционально растут затраты энергии на привод из-за потерь давления в штатных технологических трактах, что, очевидно, ведет к росту начальной температуры в газовой турбине, требует увеличения расхода топлива и воздуха на охлаждение, негативно сказывается на экономичности и надежности ТТКА. Так, например, подключение головного агрегата ГТТ-3ПН повышенной производительности к штатной линии УКЛ-7 было одной из основных причин низкой энергоэффективности и надежности. Стало очевидным, что существенный рост эффективности УКЛ-7 (на базе новых ТТКА повышенной производительности) может быть достигнут лишь за счет соответствующей адресной реконструкции технологического оборудования, прежде всего, с целью увеличения пропускной способности, что непременно связано со значительными дополнительными издержками.

Вместе с тем, на сегодня производительность ряда технологических линий УКЛ-7 со штатными ТТКА ГТТ-3М практически достигла намеченных в [1] значений, главным образом, за счет последовательной модернизации оборудования технологической схемы.

Детальный параметрический анализ основных узлов ГТТ-3М в составе линий УКЛ-7, проведенный ООО «ТурбоРеф Инжиниринг» на основе статистики ряда находящихся в эксплуатации агрегатов, показал, что возможности повышения их эффективности

Табл.
Исходные данные и основные показатели эффективности различных ТТКА для УКЛ-7

Параметр		Значение						
Наименование, размерность		ГТТ-3М Серия	ГТТ-3М Локальная модернизация	ГТУ-8 Головной	ГТУ-8 Серия	ГТТ-3ПН Головной	ГТТ-9 проект	
							Вариант 1	Вариант 2
Расход воздуха в компрессор, т/ч		103	106*	100,8	111,5	117,75	98	122,6
Расход воздуха на технологию, т/ч		93,7	102*	80,4	96,48	78,96	82*	102,6
Температура (вход/выход), °С:	осевого компрессора	20 / 170	20 / 172	19 / 291	25 / 297	20 / 298	20 / 276	20 / 280
	центробежного нагнетателя	45 / 143	45 / 145	—				
Адиабатный КПД (по патрубкам):	осевого компрессора	0,855	0,853*	0,839	0,84	0,8365	0,84*	0,85*
	центробежного нагнетателя	0,7235	0,721*	—				
	газовой турбины	0,84*	0,855*	—			0,87*	0,88*
Отношение давлений	осевого компрессора	3,684	3,7*	7,71	7,58	7,879	7,39*	7,41
	центробежного нагнетателя	2,08	2,1*	—				
Потребная мощность сжатия, кВт	компрессорной группы	7330**	7688**	—				
	осевого компрессора	4455	4612	7798	8520,8	9264,5	7365,8	9122,4
	центробежного нагнетателя	2577	2807	—				
Удельная мощность сжатия, кВт/(т/ч)		78,23	75,37	96,99	88,32	117,33	89,83	88,91
Относительная удельная мощность сжатия, %		100	92,70	124	112,9	149,9	114,8	113,7
Расход природного газа, кг/ч		1060	1092	848	926	1322	770*	950*
Удельный расход природного газа на тонну расхода воздуха, кг/т		11,31	10,7	10,55	9,6	16,74	9,39	9,26

*экспертно откорректированные данные; **потребная мощность с учетом потерь в редукторе

далеко не исчерпаны. Определенные резервы для этого также есть на стыке ТТКА и технологии. По нашему мнению, локальная модернизация отдельных узлов и систем ГТТ-ЗМ (в основном, газовой турбины и системы охлаждения) в ходе плановых капитальных ремонтов позволит заметно повысить эффективность. Для сравнения в таблице приведены оценочные показатели подобной локальной модернизации.

Реализация концепции модернизации ГТТ-ЗМ в ходе плановых капитальных ремонтов позволит существенно оптимизировать жизненный цикл турбокомпрессорных агрегатов, находящихся в эксплуатации в составе штатных технологических линий УКЛ-7, с учетом заметного увеличения производительности и энергоэффективности при ограниченных затратах. **Д**

Список использованных источников

1. Модернизация действующих агрегатов производства азотной кислоты АК-72 и УКЛ-7. Направления разработки новых отечественных агрегатов: доклад на конференции в АО «Акрон», г. Великий Новгород, 12–13 октября 2014 г. / ОАО «ГИАП».

2. Бонне, М. Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности / М. Бонне, Н. Д. Заичко, М. М. Караваев [и др] : под ред. В. М. Олевского. – М.: Химия, 1985. – 398 с.

3. Рис, В. Ф. Центробежные компрессорные машины / В. Ф. Рис. – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 351 с.

4. Холодильные машины : учебник для ВУЗов под общ. ред. проф. Л. С. Тимофеевского. – СПб. : Политехника, 2006. – 944 с.

5. Павлюк, А. И. Опыт эксплуатации и модернизация ГТУ-8 / А. И. Павлюк // Химическая техника. – 2014. – № 12. – URL: <https://chemtech.ru/opyt-jekspluatacii-i-modernizacija-gtu-8> (дата обращения: 19.03.2026).

6. Кондратюк, В. В. Газотурбинные установки АО «Дальэнергомаш» для технологических агрегатов УКЛ-7 / В. В. Кондратюк, Р. В. Гулидов // Химическая техника. – 2017. – № 4. – URL: <https://chemtech.ru/gazoturbinnye-ustanovki-ao-daljenenergomash-dlja-tehnologicheskikh-agregatov-ukl-7> (дата обращения: 19.03.2026).

7. Газовая технологическая турбина (ГТТ-9) с улучшенными показателями надежности, ремонтпригодности и технико-экономическими показателями // Сайт АО «Дальэнергомаш». – URL: <https://www.daleenergomash.ru/ru/product/gazovaya-tehnologicheskaya-turbina-gtt-9> (дата обращения: 19.03.2026).



АО «Силовые машины» изготовило турбину ГТЭ-170 для Хабаровской ТЭЦ-4.

Газовая турбина ГТЭ-170.1 предназначена для строительства Хабаровской ТЭЦ-4 (ПАО «РусГидро») в рамках программы по развитию тепловой электроэнергетики Дальнего Востока. Турбина прошла программу заводских испытаний, включая вращение ротора валоповоротным устройством, на сборочном стенде Ленинградского металлического завода в присутствии представителей заказчика.

Возводимая Хабаровская ТЭЦ-4 заменит ТЭЦ-1, которая эксплуатируется уже 70 лет и является крупнейшей в Хабаровском крае. На новой электростанции применена парогазовая технология на базе двух газовых турбин ГТЭ-170.1 производства АО «Силовые машины». Специалисты предприятия обеспечат шефмонтаж и шефналадку оборудования на станции. В качестве топлива будет использоваться природный газ.

Проектная мощность Хабаровской ТЭЦ-4 составляет 410 МВт и 1389 Гкал/ч. Ввод ТЭЦ позволит снизить нарастающий дефицит в объединенной энергосистеме ДФО, обеспечить растущие нагрузки потребления и создать условия для развития региона.

АО «Силовые машины» осуществляет серийное производство газовых турбин при поддержке Минпромторга России. Мощность производства на сегодня – 8 турбин в год, а с 2029 года составит 10 турбин. Параллельно предприятие ведет конструкторские работы по развитию ряда газовых турбин с повышением их мощности и КПД.

Power Machines JSC has manufactured a GTE-170 turbine for the Khabarovsk CHPP-4.

The GTE-170.1 gas turbine is intended for the construction of the Khabarovsk CHPP-4 as part of the state program for the development of thermal power generation in the Far East. The turbine underwent a series of factory tests, including rotor rotation using a shaft-turning device, on an assembly bench at the Leningrad Metal Works in the presence of customer representatives.