

УДК 621.438

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

А. Е. Кишалов¹, В. Д. Липатов²

¹kishalov@ufanet.ru, ²lipatvdim@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 09.09.2021

Аннотация. Выполнен анализ изменения основных параметров ГТУ, характеризующих их эффективность, в зависимости от года разработки. Рассмотрены как промышленные, так и конвертированные ГТУ отечественного и зарубежного производства, начиная от 1970-х годов и заканчивая настоящим временем. Недостающие данные по рабочим параметрам ГТУ определены на основании термогазодинамического моделирования установок при помощи системы имитационного моделирования DVIgW. Сделан анализ распределения ГТУ по классу мощностей и их типу. Выполнено сопоставление характерных параметров для промышленных и конвертированных ГТУ.

Ключевые слова: ГТУ; конвертированный ГТД; термогазодинамическое моделирование; DVIgW; энергетика; ОДК; Силовые машины; Mitsubishi; General Electric; Siemens; Ansaldo Energy.

ВВЕДЕНИЕ

Современная отечественная энергетика по большей части представлена тепловыми электростанциями, использующими органическое топливо. Основа этих станций – паротурбинные установки (ПТУ). Вместе с тем, большинство из ныне эксплуатируемых ПТУ и парогенераторов морально устарели и работают со значительно более низкими, чем возможны на текущем уровне развития техники, значениями КПД [1]. Кроме того, эти установки производят большее количество выбросов в окружающую среду. Таким образом, необходима модернизация электростанций оборудованием, удовлетворяющим современным требованиям как по эффективности эксплуатации, так и по экологическим характеристикам. Одно из возможных направлений такой модернизации – это использование газотурбинных установок (ГТУ).

КПД некоторых из перспективных ГТУ достигает значений, приближающихся к 44 % [2, 3]. Данные установки являются флагманами компаний-производителей и сочетают в себе все передовые технологии. Использование современных материалов позволяет безопасно эксплуатировать установки с температурой газов перед турбиной вплоть до 1700 °С [4].

Целью статьи является сбор информации по ключевым параметрам различных ГТУ как отечественного, так и зарубежного производства, ее систематизация и анализ.

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Для каждой из рассматриваемых ГТУ исследовались следующие параметры: мощность установки N , удельная мощность N/G_v (вырабатываемая мощность на единицу расхода рабочего тела), КПД η , суммарная степень повышения давления π_k , температура газов на входе в турбину T_3 , температура газов на выходе из ГТУ T_4 . Все данные по установкам были полу-

чены из открытых источников информации [5–32]. Также параметры установок, согласно данным открытых источников, были дополнены результатами имитационного моделирования. Построение моделей и их расчет выполнялся с использованием системы имитационного моделирования DVIGw. Каждая такая модель была идентифицирована и верифицирована на основании прочих имеющихся данных по установке. При отсутствии таких данных рассматривались известные установки максимально близкого класса к текущей установке. Обобщенная модель ГТУ в системе DVIGw приведена на рис. 1. Обобщенными элементами являются компрессор и турбина (номера 3 и 8 на рис. 1 соответственно). Для них могут использоваться один или несколько элементов, что определяется схемой установки.

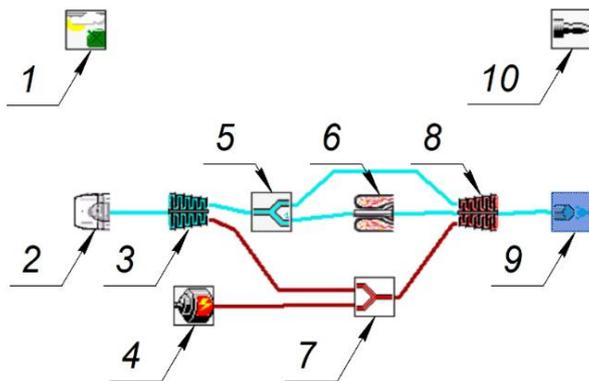


Рис. 1. Обобщенная топологическая модель исследуемых установок:

- 1 – элемент «начальные условия»; 2 – элемент «входное устройство»; 3 – система элементов «компрессор»; 4 – элемент «потребитель мощности»; 5 – элемент «отбор газа»; 6 – элемент «камера сгорания»; 7 – элемент «отбор мощности»; 8 – система элементов «турбина»; 9 – элемент «выход газа»; 10 – элемент «результаты»

Список исследуемых ГТУ приводится в табл. 1. Всего было проанализировано 89 ГТУ. Анализировались параметры как промышленных (П), так и конвертированных (А) ГТУ. Следует отметить, что для некоторых ГТУ (в частности, установки фирмы General Electric) различные модификации одной модели из модельного ряда установок позиционировались как разные ГТУ. Это обусловлено тем, что для таких модификаций зачастую наблюдается значительное расхождение в рабочих параметрах, а сами модификации имеют различные даты разработки/ввода в эксплуатацию.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ГТУ

С ростом года ввода в эксплуатацию (или проведения полноценных промышленных испытаний для перспективных установок) ГТУ имеется тенденция к наращиванию мощности установки (рис. 2). Так, в настоящее время имеется три варианта установок, проектная мощность которых превосходит 500 МВт: Ansaldo Energy GT36 S5 (538 МВт), General Electric 9HA.02 (571 МВт) и Siemens SGT5-9000HL (593 МВт). Среди наиболее мощных образцов установок промышленного типа для каждого из производителей наблюдается примерно линейный рост мощности ГТУ по годам. Наиболее заполненным является сектор установок с мощностью до 100 МВт, в котором представлено 57,3 % всех анализируемых ГТУ. Большая часть установок, представленных в этом секторе, являются конвертированными газотурбинными двигателями, составляя 66,7 % от общего количества установок в этом секторе. Иначе обстоит ситуация для области мощностей установок, превосходящих 100 МВт: в данном секторе имеется всего 1 конвертированная установка GE LMS100. Это обусловлено тем, что авиационных газотурбинных двигателей таких мощностей нет, поскольку они имели бы неоправданно большие размеры, что неприменимо для летательных аппаратов.

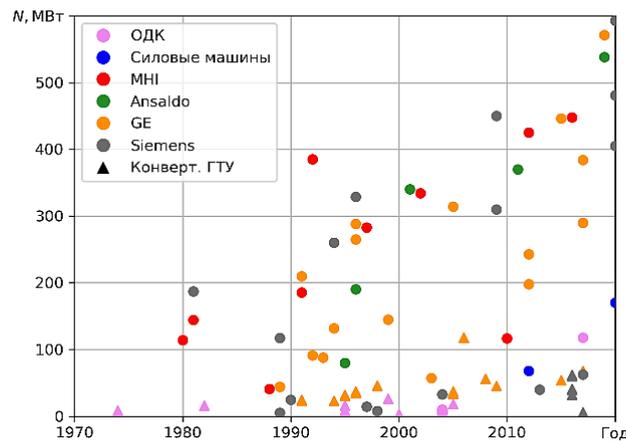


Рис. 2. Зависимость мощности установок от года ввода в эксплуатацию

Таблица 1

Список исследуемых ГТУ

Производитель	Тип ГТУ	Модель
Силовые машины	П	ГТЭ-65, ГТЭ-170
ОДК	П	ГТД-110М, ГТД-4РМ, ГТД-6,3РМ, ГТД-10РМ
	А	ДО-49Р, ГТД-6РМ, ГТД-8РМ, АЛ-31СТ, АЛ-31СТЭ, ГТП-10/95, НК-16СТ, НК-37
Mitsubishi (MHI)	П	Н-25, Н-100, M501D, M501F, M501GAC, M501JAC, M701DA, M701F, M701G, M701JAC
Ansaldo Energy	П	GT36 S5, GT26, AE94.3A, AE94.2, AE64.3A
General Electric (GE)	П	9HA.01, 9HA.02, 7HA.01, 7HA.02, 9F.05, 9F.04, 9F.03, 7F.05, 7F.04, 9E.03, 9E.04, 7E.03, GT13E2, 6F.03, 6F.01, 6B.03
	А	LMS100, LMS100 (60 Гц), LM6000 PC, LM6000 PG, LM6000 PF, LM6000 PF+, LM9000, LM2500, LM2500 (60 Гц), LM2500+, LM2500+ (60 Гц), LM2500+ DLE, LM2500+ DLE (60 Гц), LM2500 DLE, LM2500 DLE (60 Гц), LM2500+ G4, LM2500+ G4 (60 Гц), LM2500+ G4 DLE, LM2500+ G4 DLE (60 Гц), TM2500, TM2500 (60 Гц)
Siemens	П	SGT5-9000HL, SGT6-9000HL, SGT5-8000HL, SGT5-8000H, SGT6-8000H, SGT5-4000F, SGT6-5000F, SGT5-2000E, SGT6-2000E, SGT-800, SGT-750, SGT-700, SGT-600, SGT-400, SGT-300, SGT-100
	А	SGT-A65, SGT-A65 (60 Гц), SGT-A45, SGT-A45 (60 Гц), SGT-A35, SGT-A35 (60 Гц), SGT-A05

Отечественные ГТУ представлены преимущественно в секторе мощностей до 100 МВт, в котором находится 85,7 % анализируемых ГТУ. Медианное значение мощности отечественных ГТУ составляет 13,1 МВт, а переход на более высокий ряд мощностей наблюдается только за последнюю декаду (установки ГТЭ-65, ГТД-110М, ГТЭ-170). Преобладающими среди отечественных ГТУ являются конвертированные двигатели, составляя 57 % от общего количества. Данное обстоятельство обусловлено спецификой отечественной энергетики, которая шла по пути развития паротурбинной энергетики.

Развитие газотурбинных технологий в мире в целом приводит к тому, что промышленные ГТУ вытесняют конвертированные установки. Доля промышленных ГТУ, выпущенных или спроектированных за последнюю декаду, составляет 70 %. Аналогичный параметр за промежуток 2000–2010 годов составляет 53 %.

Похожая тенденция наблюдается для КПД установок (рис. 3). Медианное значение КПД ныне выпускаемых и проектных ГТУ составляет 37,2 %, при этом максимальное и минимальное значения составляют соответственно 44,7 % (GE LMS100) и 24 % (ГТП-10/953). Каждую декаду медианное и минимальное значения КПД установок увеличиваются в среднем на 2,9 и 4,6 % в абсолютных значениях соответственно. Максимальное значение КПД за последние две декады остается примерно одинаковым, что обусловлено максимальными

допустимыми температурами материалов лопаток первых ступеней турбины. Как было отмечено выше, развитие газотурбинных технологий приводит к росту количества моделей промышленных ГТУ в сравнении с конвертированными. Новые модели таких ГТУ (взятые за последнюю декаду) являются более совершенными, чем конвертированные, имея медианное значение КПД 42,3 % против 39,4 %.

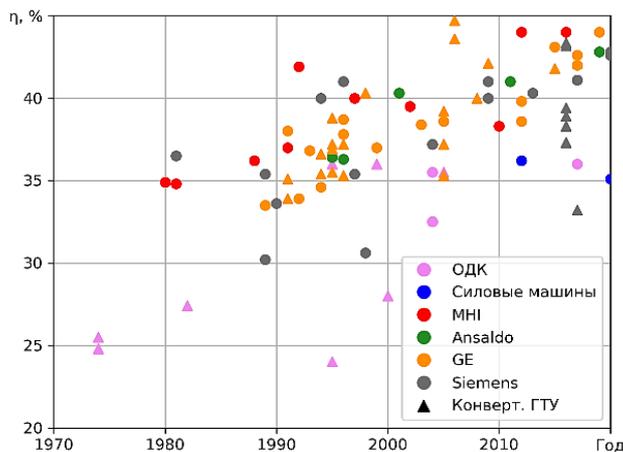


Рис. 3. Зависимость КПД установок от года ввода в эксплуатацию

Эффективность отечественных ГТУ несколько ниже, чем средние показатели по всем ГТУ. Медианное значение эффективности всех отечественных ГТУ составляет 33,8 %. Если рассматривать отдельно конвертированные и промышленные ГТУ, то медианные значения их КПД составят соответственно 31,6 % и 35,5 %. Большинство отечественных конвертированных ГТУ выполнено на базе авиационных двигателей военного назначения, для которых ресурс является менее важным параметром, чем мгновенная эффективность. Это приводит к достаточно высоким цикловым параметрам, которые должны быть занижены для ГТУ, чтобы обеспечить требуемый ресурс. Это обстоятельство и обуславливает лучшую эффективность промышленных ГТУ, которые изначально разрабатывались для обеспечения заданного высокого ресурса.

Совершенство ГТУ характеризуется также и удельными параметрами. В качестве основного такого параметра используется удельная мощность. Данный параметр характеризует массогабаритные характеристики установки, а также уровень теплового загрязнения среды (количество выбрасываемого в атмосферу тепла на единицу мощности). Зависимость удельной мощности установок от года выпуска представлена на рис. 4.

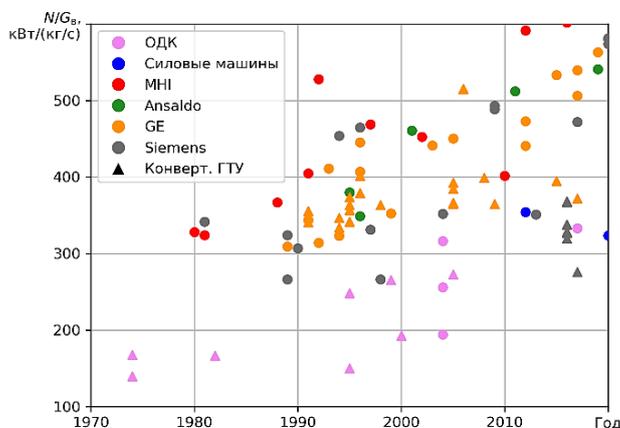


Рис. 4. Зависимость удельной мощности установок от года ввода в эксплуатацию

Промышленные ГТУ имеют более высокий уровень удельной мощности, чем конвертированные. Медианное значение удельной мощности для промышленных ГТУ за последнюю декаду составляет 512 кВт/кг/с, а для конвертированных – 338 кВт/кг/с. При этом четко про-

слеживается тенденция к увеличению данного параметра для современных промышленных ГТУ. Если рассматривать предшествующую историю развития ГТУ, медианное значение удельной мощности для промышленных и конвертированных ГТУ составит 352 и 357 кВт/кг/с соответственно.

Повышение эффективности ГТУ связано с ростом цикловых параметров T_3 и π_k . Изменение этих параметров по годам отображено на рис. 5 и 6.

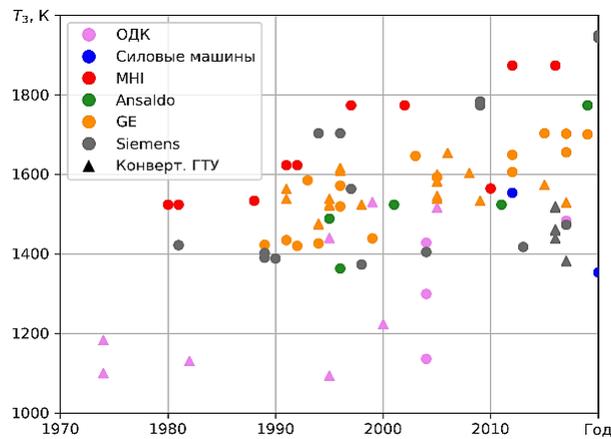


Рис. 5. Зависимость температуры газов перед турбиной для установок от года ввода в эксплуатацию

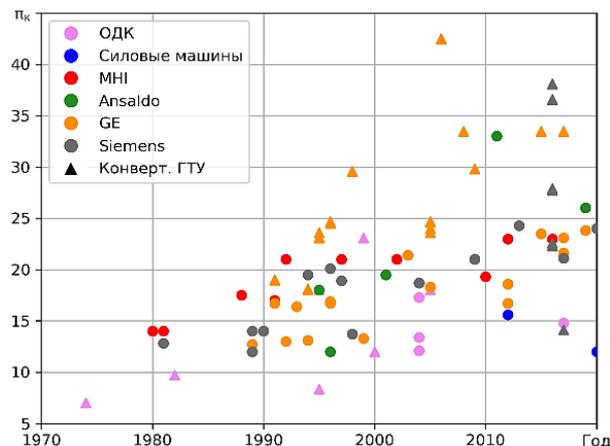


Рис. 6. Зависимость суммарной степени повышения давления установок от года ввода в эксплуатацию

Для современных промышленных установок медианное значение T_3 составляет 1677,6 К. Для современных конвертированных установок данное значение составляет 1461 К. Современные промышленные ГТУ работают с температурами вплоть до 1950 К [6]. Соотношение по температуре газов для промышленных и конвертированных установок наблюдается не только в последнее десятилетие, но и на протяжении всей истории выпуска ГТУ. Данное обстоятельство является следствием специфики конвертированных ГТУ. Такие ГТУ зачастую разрабатываются на базе военных ГТД, рассчитанных на максимальную работу с повышенным уровнем T_3 в течение непродолжительного промежутка времени. При переводе таких установок в ГТУ важным становится вопрос увеличения их ресурса, который может быть решен снижением температуры газов перед турбиной. Температура газов перед турбиной является важнейшим параметром, определяющим эффективность установки. Исходя из зависимости, представленной на рис. 4, можно сделать вывод, что в последующее время эффективность ГТУ будет возрастать менее эффективно, чем раньше. В первую очередь, это обусловлено тем, что совершенствование как и системы охлаждения ГТУ, так и материалов рабочих элементов требует все более значительных усилий.

Обратная картина наблюдается по значениям π_k : медианные значения для современных промышленных и конвертированных ГТУ составляют соответственно 23,05 и 27,9. Если рас-

сматривать зависимость мощности установки от степени повышения давления (рис. 7), то видно, что установки двух типов четко выделяются в две отдельные области, внутри которых прирост мощности может быть описан линейным трендом.

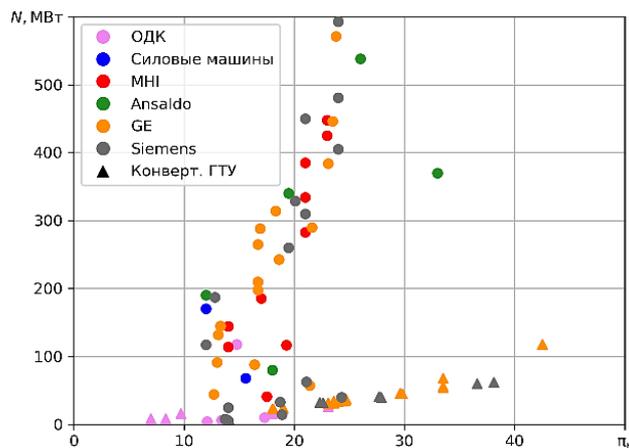


Рис. 7. Зависимость мощности установок от суммарной степени повышения давления

Такие же области наблюдаются и для зависимости КПД установки от степени повышения давления (рис. 8). Разброс по π_k для промышленных ГТУ меньше, чем для конвертированных: 12...33 против 7...42,5. При одном и том же значении π_k КПД промышленных установок больше, чем КПД конвертированных установок примерно на 1,6 % в абсолютных значениях. Причиной этого является, как уже было отмечено, специфика конвертированных ГТУ, которые изначально были рассчитаны на максимальную мгновенную эффективность, а не на продолжительную эксплуатацию в составе энергетических объектов.

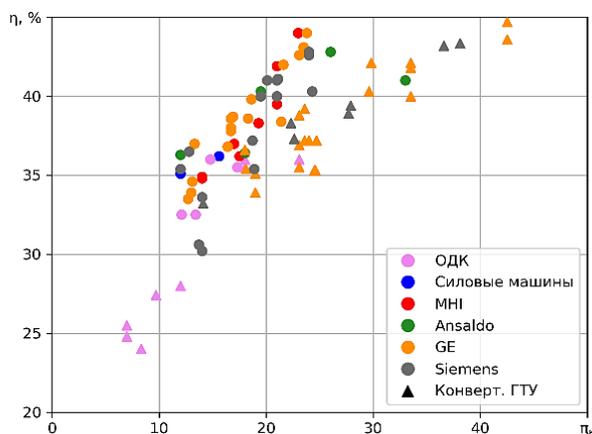


Рис. 8. Зависимость КПД установок от суммарной степени повышения давления

Еще одним характерным параметром для ГТУ является температура газов на выходе из установки, поскольку она определяет эффективность использования ГТУ в составе ПГУ. Зависимость T_4 от года выпуска ГТУ представлена на рис. 9. Данная зависимость коррелирует с зависимостью T_3 от года выпуска и имеет тенденцию к возрастанию. Рост температуры за установкой более выражен для промышленных ГТУ, чем для конвертированных. Для них также характерен более высокий уровень T_4 , что обусловлено и более высоким уровнем T_3 для установок этого типа.

Для современных промышленных и производных ГТУ медианное значение T_4 составляет 900,7 и 756,2 К соответственно. С одной стороны, это обусловлено тем, что промышленные ГТУ работают с большими значениями T_3 , нежели конвертированные. С другой стороны, из-за того что производные ГТУ имеют несколько большие значения π_k , чем промышленные, степень понижения давления в турбине для них тоже несколько выше. Это приводит к тому, что при прочих равных условиях температура газа на выходе из турбины для конвертиро-

ванных ГТУ будет ниже. Относительно высокие значения температуры газов на выходе из современных промышленных ГТУ в совокупности с большими расходами газа дают возможность использовать их в составе ПГУ без дожигания топлива, работающими с «классической» для отечественной энергетики температурой пара 550 °С.

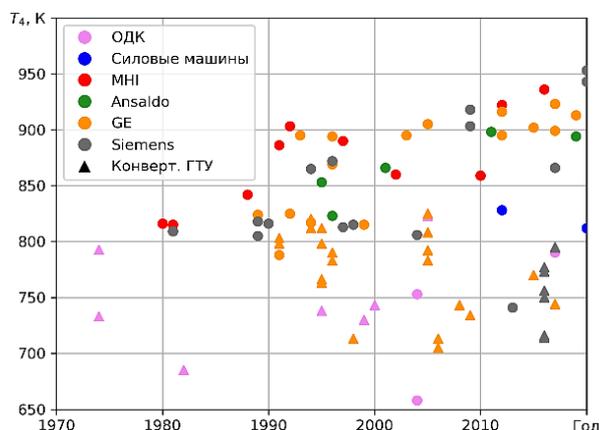


Рис. 9. Зависимость температуры газов на выходе из установки от года выпуска

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была собрана, структурирована и обработана информация по ключевым параметрам 89 серийно выпускаемых и перспективных ГТУ отечественного и зарубежного производства. Проанализировано изменение параметров в зависимости от года выпуска как для промышленных, так и для конвертированных ГТУ. Установлено, что ниша маломощных установок (до 100 МВт) по большей части (66,7 %) представлена конвертированными ГТУ. Для больших мощностей наблюдается доминирование промышленных ГТУ. Показано, что для промышленных ГТУ за последнюю декаду достигнуты значительные улучшения в вопросах улучшения их удельной мощности. Имеется тенденция к росту всех цикловых параметров, что также обуславливает и рост КПД. Отмечен замедленный рост температуры газов перед турбиной, что обусловлено сложностями в разработке новых жаростойких материалов. Определены медианные значения КПД современных промышленных и конвертированных ГТУ, которые составляют соответственно 42,3 % и 39,4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольховский Г. Г., Тумановский А. Г. Теплоэнергетические технологии в период до 2030 г. // Известия российской академии наук. Энергетика. 2008. № 6. С. 79–94. [G. G. Olkhovsky, A. G. Tumanovskii, "Heat and power technologies in the period up to 2030", (in Russian), in *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Energetika*, no. 6, pp. 79-94, 2008.]
2. M701J Series. [Электронный ресурс]. URL: <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m701j> (дата обращения 07.05.2021). [M701J Series (2021, May 07). [Online]. Available: <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m701j>]
3. 9HA.01/.02 Gas Turbine. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/9ha> (дата обращения 07.05.2021). [M701J Series (2021, May 07). [Online]. Available: <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m701j>]
4. Beloborodov S. S., Dudolin A. A. Competitiveness of the combined production of CHPP with the best available technologies for the separate production of electric energy and heat // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683, no. 4. Pp. 1-12. [S. S. Beloborodov, A. A. Dudolin, "Competitiveness of the combined production of CHPP with the best available technologies for the separate production of electric energy and heat", in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1683, no. 4, pp. 1-12, 2020.]
5. The Project of a GTE-65 Power-Generating Gas-Turbine Unit / A. S. Lebedev, et al. // Thermal Engineering. 2008. Vol. 55, no. 1. Pp. 54-61. [A. S. Lebedev, et al., "The Project of a GTE-65 Power-Generating Gas-Turbine Unit", in *Thermal Engineering*, vol. 55, no. 1, pp. 54-61, 2008.]
6. Upgrading GTE-160 Gas Turbines at Moscow CPPs / G. G. Olkhovsky, et al. // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49, Iss. 1. Pp. 46-49. [G. G. Olkhovsky et al., "Upgrading GTE-160 Gas Turbines at Moscow CPPs", in *Power Technology and Engineering*, vol. 49, Iss. 1, pp. 46-49, 2015.]
7. Особенности конвертирования форсированной по скорости камеры сгорания при работе на природном газе / А. Ф. Ивах [и др.] // Вестник СГАУ. 2002. № 2 (2). С. 21–26. [A. F. Ivah, et al., "Peculiarities of converting a combustion chamber forced by speed when operating on natural gas", (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 2 (2), pp. 21-26, 2002.]

8. **Гумеров Х. С., Каримов Т. Р.** Математическое моделирование рабочего процесса энергетической установки на базе авиационного ГТД с системой газоснабжения // Вестник УГАТУ. 2004. Т. 5, № 1 (9). С. 55–60. [H. S. Gumerov, T. R. Karimov, "Mathematical modeling of the working process of a power plant based on an aviation gas turbine engine with a gas supply system", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 5, no. 1 (9), pp. 55-60, 2004.]
9. **Maekawa A.** Evolution and future trend of large frame gas turbine for power generation // *Journal of Power and Energy Systems*. 2011. Vol. 5, Iss. 2. Pp. 161-170. [A. Maekawa, "Evolution and future trend of large frame gas turbine for power generation", in *Journal of Power and Energy Systems*, vol. 5, Iss. 2, pp. 161-170, 2011.]
10. **Technology** Application to MHPS Large Frame F series Gas Turbine / J. Masada, et al. // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2018. Vol. 55, no. 1. Pp. 11-18. [J. Masada, et al., "Technology Application to MHPS Large Frame F series Gas Turbine", in *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 55, no. 1, pp. 11-18, 2018.]
11. **Development** of 1600 °C-class high-efficiency gas turbine for power generation applying J-Type technology / M. Yuri, et al. // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2013. Vol. 50, no. 3. Pp. 1-10. [M. Yuri, et al., "Development of 1600 C-class high-efficiency gas turbine for power generation applying J-Type technology", in *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 50, no. 3, pp. 1-10, 2013.]
12. **Николаев Ю. Е., Мракин А. Н.** Оценка эффективности применения на малых ТЭЦ комбинированных газозвудушных энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 1–2. С. 40–46. [Yu. E. Nikolaev, A. N. Mrakin, "Evaluation of the efficiency of using combined gas-air power plants at small CHPPs", (in Russian), in *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki*, no. 1-2, pp. 40-46, 2009.]
13. **Archives:** Gas Turbine Products. [Электронный ресурс]. URL: <https://etn.global/gas-turbine-products/> (дата обращения 07.05.2021). [Archives: Gas Turbine Products (2021, May 07). [Online]. Available: <https://etn.global/gas-turbine-products/>]
14. **Study** of sequential two-stage combustion in a low-emission gas turbine combustion chamber / L. A. Bulysova, et al. // *Thermal Engineering*. 2018. Vol. 65, no. 11. Pp. 806-817. [L. A. Bulysova, et al., "Study of sequential two-stage combustion in a low-emission gas turbine combustion chamber", in *Thermal Engineering*, vol. 65, no. 11, pp. 806-817, 2018.]
15. **Analysis** of the GT26 single-shaft gas turbine performance and emissions / A. Gamannossi, et al. // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 126. Pp. 461-468. [A. Gamannossi, et al., "Analysis of the GT26 single-shaft gas turbine performance and emissions", in *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 461-468, 2017.]
16. **Experience** gained from construction of low-emission combustion chambers for on-land large-capacity gas-turbine units: GT24/26 / L. A. Bulysova, et al. // *Thermal Engineering*. 2018. Vol. 65, no. 6. Pp. 362-370. [L. A. Bulysova, et al., "Experience gained from construction of low-emission combustion chambers for on-land large-capacity gas-turbine units: GT24/26", in *Thermal Engineering*, vol. 65, no. 6, pp. 362-370, 2018.]
17. **Heavy** duty gas turbine simulation: a compressor IGV airfoil off-design characterization / C. Carcasci, et al. // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, (UK, Glasgow, June 14-18 2010). 2010. Vol. 43963. Pp. 817-824. [C. Carcasci, et al., "Heavy duty gas turbine simulation: a compressor IGV airfoil off-design characterization", in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Glasgow, UK, 2010, vol. 43963, pp. 817-824.]
18. **Bozzi L., Malavasi F., Garotta V.** Heavy-duty gas turbines axial thrust calculation in different operating conditions // *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, (Canada, Vancouver, June 6-10 2011). 2011. Vol. 54655. Pp. 945-954. [L. Bozzi, F. Malavasi, V. Garotta, "Heavy-duty gas turbines axial thrust calculation in different operating conditions", in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vancouver, Canada, 2011, vol. 54655, pp. 945-954.]
19. **Torbidoni L., Abba L.** Ansaldo Energia AE64. 3A Gas Turbine Upgrade // *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, (Canada, Montreal, June 15-19 2015). 2015. Vol. 42733. Pp. 1-10. [L. Torbidoni, L. Abba, "Ansaldo Energia AE64. 3A Gas Turbine Upgrade", in *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*, Montreal, Canada, 2015, vol. 42733, pp. 1-10.]
20. **Sequential** combustion in steam methane reformers for hydrogen and power production with CCUS in decarbonized industrial clusters / L. Herraiz, et al. // *Frontiers in Energy Research*. 2020. Vol. 8. Article number 180. [L. Herraiz, et al., "Sequential combustion in steam methane reformers for hydrogen and power production with CCUS in decarbonized industrial clusters", in *Frontiers in Energy Research*, vol. 8, article number 180, 2020.]
21. **Humidified** exhaust recirculation for efficient combined cycle gas turbines / A. A. Taimoor, et al. // *Energy*. 2016. Vol. 106. Pp. 356-366. [A. A. Taimoor, et al., "Humidified exhaust recirculation for efficient combined cycle gas turbines", in *Energy*, vol. 106, pp. 356-366, 2016.]
22. **Тепловые** испытания газотурбинной установки 9FB фирмы «Дженерал электрик» / Г. Г. Ольховский [и др.] // Теплоэнергетика. 2013. № 9. С. 3–8. [G. G. Olkhovsky, et al., "Thermal tests of the 9FB gas turbine unit manufactured by General Electric", (in Russian), in *Teploenergetika*, no. 9, pp. 3-8, 2013.]
23. **Aeroderivative** Engines in LNG Liquefaction Mechanical Drive Applications / C. B. Meher-Homji, et al. // *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, (Norway, Oslo, June 11-15 2018). 2018. Vol. 75567. Pp. 1-11. [C. B. Meher-Homji, et al., "Aeroderivative Engines in LNG Liquefaction Mechanical Drive Applications", in *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Oslo, Norway, 2018, vol. 75567, pp. 1-11.]
24. **Dry** low emissions combustor development / N. D. Joshi, et al. // *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, (Sweden, Stockholm, June 2-5 1998). 1998. Vol. 310. Pp. 1-7. [N. D. Joshi, et al., "Dry low emissions combustor development", in *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, Stockholm, Sweden, 1998, vol. 310, pp. 1-7.]
25. **Bulysova L. A., Vasil'ev V. D., Berne A. L.** Low-Emission combustion of fuel in aeroderivative gas turbines // *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64, no. 12. Pp. 891-897. [L. A. Bulysova, V. D. Vasil'ev, A. L. Berne, "Low-Emission combustion of fuel in aeroderivative gas turbines", in *Thermal Engineering*, vol. 64, no. 12, pp. 891-897, 2017.]

26. **Influence** of a recuperator on the performance of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle / B. S. Choi, et al. // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 124. Pp. 1301-1311. [B. S. Choi, et al., "Influence of a recuperator on the performance of the semi-closed oxy-fuel combustion combined cycle", in *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 1301-1311, 2017.]
27. **Khademi M., Khosravi A., Alizadeh S.** Optimizing of gas turbine model SGT5-2000E (KWU V94. 2) operating parameters using Genetic and PSO algorithms // *The 1st Iran Energy Association National Conference*, (Tehran, Iran, 2014). 2014. Pp. 19-20. [M. Khademi, A. Khosravi, S. Alizadeh, "Optimizing of gas turbine model SGT5-2000E (KWU V94. 2) operating parameters using Genetic and PSO algorithms", in *The 1st Iran Energy Association National Conference*, Iran, Tehran, 2014, pp. 19-20.]
28. **Siemens SGT-800 Industrial Gas Turbine Enhanced to 50 MW: Turbine Design Modifications, Validation and Operation Experience** / D. Lörstäd, et al. // *ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*, (San Antonio, USA, June 3-7 2013). 2013, vol. 95478. P. 1-12. [D. Lörstäd, et al., "Siemens SGT-800 Industrial Gas Turbine Enhanced to 50 MW: Turbine Design Modifications, Validation and Operation Experience", in *ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*, San Antonio, USA, 2013, vol. 95478, pp. 1-12.]
29. **Hellberg A., Andersson T., Häggmark A.** Design, Testing and Performance of the Recently Developed 37 MW Siemens SGT-750 // *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, (Copenhagen, Denmark, June 11-15 2012). 2012. Vol. 68249. Pp. 45-50. [A. Hellberg, T. Andersson, A. Häggmark, "Design, Testing and Performance of the Recently Developed 37 MW Siemens SGT-750", in *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Denmark, Copenhagen, 2012, vol. 68249, pp. 45-50.]
30. **Malakhov S. V., Olkhovskiy G. G., Golubnichii V. A.** Testing the type GT-10S (SGT 700) gas turbine units at the Sochi thermal power station // *Thermal engineering*. 2006. Vol. 53, no. 12. Pp. 947-955. [S. V. Malakhov, G. G. Olkhovskiy, V. A. Golubnichii, "Testing the type GT-10S (SGT 700) gas turbine units at the Sochi thermal power station", in *Thermal engineering*, vol. 53, no. 12, pp. 947-955, 2006.]
31. **Innovative** starting procedure of Siemens SGT-600 in cold climate conditions / M. Blomstedt, et al. // *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, (Vancouver, Canada, June 6-10 2011). 2011. Vol. 46409. Pp. 1021-1026. [M. Blomstedt, et al., "Innovative starting procedure of Siemens SGT-600 in cold climate conditions", in *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, Canada, Vancouver, 2011, vol. 46409, pp. 1021-1026.]
32. **Extension** of Fuel Flexibility in the Siemens Dry Low Emissions SGT-300-1S to Cover a Wobbe Index Range of 15 to 49 MJ/m³ / K. Liu, et al. // *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, (Copenhagen, Denmark, June 11-15 2012). 2012. Vol. 68838. Pp. 601-609. [K. Liu, et al., "Extension of Fuel Flexibility in the Siemens Dry Low Emissions SGT-300-1S to Cover a Wobbe Index Range of 15 to 49 MJ/m³", in *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Denmark, Copenhagen, 2012, vol. 68838, pp. 601-609.]

ОБ АВТОРАХ

КИШАЛОВ Александр Евгеньевич, доц. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики УГАТУ. Дипл. инж. по авиационным двигателям и энергетическим установкам (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неустановившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, САПР авиационных ГТД.

ЛИПАТОВ Вадим Дмитриевич, асп. каф. АТиТ. Дипл. магистр по спец. теплоэнергетики и теплотехники (УГАТУ, 2018). Иссл. в обл. численного моделирования рабочего процесса основных и форсажных камер сгорания.

METADATA

Title: Web OLAP conceptual data model design on the basis of situation-oriented database.

Authors: A. E. Kishalov¹, V. D. Lipatov²

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹kishalov@ufanet.ru, ²lipatvadam@gmail.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 3 (93), pp. 89-97, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The analysis of changes in the main parameters of gas turbines, which characterize their efficiency, depending on the year of development, is carried out. Both industrial and converted gas turbines of domestic and foreign production, from the 1970s to the present, are considered. The missing data on the operating parameters of the gas turbine plant were determined on the basis of thermogasdynamic modeling of installations using the DVIGw simulation system. An analysis of the distribution of gas turbines by class of power and their type is made. Comparison of characteristic parameters for industrial and converted gas turbines has been performed.

Key words: GTU; aeroderivative GTE; thermogasdynamic modeling; DVIGw; energetics; UEC; Power machines; Mitsubishi; General Electric; Siemens; Ansaldo Energy.

About authors:

KISHALOV, Alexander Evgenievich, Assoc. Prof., Dept. of Aviation Heat Engineering and Heat Power Engineering. Dipl. Engineer (USATU, 2006) of GTE and power plants. Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2010).

LIPATOV, Vadim Dmitrievich, Postgrad. Student, Dept. of Aviation Heat Engineering and Heat Power Engineering. Master (USATU, 2018) of heat power engineering and heat engineering.