

EDN: ETYEJE

УДК 621.438

Overview of the Possibility of Using Low-Power Gas Turbines

Natalia D. Chichirova, Antonina A. Filimonova,
Aleksandr S. Cherkasov* and Aleksandr I. Lyapin
*Kazan State Power Engineering University
Russian Federation, Kazan*

Received 10.02.2023, received in revised form 20.06.2023, accepted 07.07.2023

Abstract. This article provides an overview of low-power gas turbines presented on the market by domestic and foreign manufacturers. The spheres and experience of their application in various industries, operation features and further prospects for implementation are also considered. The trends in the development of this topic in scientific publications of Russian and foreign sources are analyzed. At the same time, more attention is paid to the units of domestic production. Their features and application possibilities. The problems and contradictions hindering the active development of low-power gas turbine technologies in the Russian Federation are also identified.

Keywords: low-power gas turbines, mini-CHP, decentralized power supply, gas microturbines, cogeneration.

Acknowledgements. The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science “Study of processes in a hybrid power plant fuel cell-gas turbine” (project code: FZSW-2022–0001).

Citation: Chichirova, N. D., Filimonova, A. A., Cherkasov, A. S., Lyapin, A. I. Overview of the possibility of using low-power gas turbines. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2023, 16(5), 584–600. EDN: ETYEJE



Обзор возможности применения газовых турбин малой мощности

Н. Д. Чичирова, А. А. Филимонова,
А. С. Черкасов, А. И. Ляпин

*Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. В данной статье произведен обзор представленных на рынке газовых турбин малой мощности отечественных и зарубежных производителей. Также рассмотрены сферы и опыт их применения в различных отраслях, особенности эксплуатации и дальнейшие перспективы внедрения. Проанализированы тенденции развития данной тематики в научных публикациях российских и зарубежных источников. При этом большее внимание уделено именно агрегатам отечественного производства, их особенностям и возможности применения. Выявлены проблемы и противоречия, препятствующие активному развитию газотурбинных технологий малой мощности в Российской Федерации.

Ключевые слова: газовые турбины малой мощности, мини-ТЭЦ, децентрализованное энергоснабжение, газовые микротурбины, когенерация.

Благодарности. Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» (шифр проекта: FZSW-2022–0001).

Цитирование: Чичирова Н. Д. Обзор возможности применения газовых турбин малой мощности / Н. Д. Чичирова, А. А. Филимонова, А. С. Черкасов, А. И. Ляпин. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(5). С. 584–600. EDN: ETYEJE

Введение. Развитие современного энергетического машиностроения, с одной стороны, идет по пути наращивания единичной мощности энергоблоков, а значит, создания паровых и газовых агрегатов большой единичной мощности, поскольку это ведет к повышению технико-экономических показателей энергоблоков. А с другой стороны, также ведутся разработки газовых машин малой мощности для обеспечения тепловой и электрической энергией локальных децентрализованных потребителей. Что касается производства ГТУ большой мощности класса H и F, то в данном сегменте ассортимент представлен исключительно зарубежными агрегатами. Такие компании, как Siemens, General Electric, Alstom [1], уверенно заняли мировой рынок за счет надежности, высокой степени автоматизации, высокой номинальной мощности единичных газовых турбин, а также качественного сервисного обслуживания оборудования. Продукция данных производителей эксплуатируется в том числе в Российской Федерации. Так, на Казанской ТЭЦ-3 установлена газовая турбина 9HA.01 производства General Electric, а на Казанской ТЭЦ-1 имеются два энергоблока ПГУ с газовыми турбинами PG6111 (FA) производства General Electric номинальной электрической мощностью 77 МВт каждая. Производство же газовых турбин малой мощности имеется как за рубежом, так и в Российской Федерации. Среди зарубежных производителей: Siemens, Capstone, Rolls-Royce, MAN, Ener Twin, Flex Energy, Turbес [2–5]. Информация о газовых турбинах малой мощности представлена в табл. 1.

Таблица 1. Обзор зарубежных газовых турбин малой мощности

Table 1. Overview of foreign low-power gas turbines

Турбина	Производитель	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, кДж/кВт*ч	КПД, %	Вид топлива	Область применения
1	2	3	4	5	6	7
SGT-400 [6]	Siemens	10,5	10 168	34.8	Природный газ, жидкое топливо	Газоперекачивающие установки, промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
SGT-300 [6]	Siemens	7,9	11 704	30.8	Природный газ, жидкое топливо	Газоперекачивающие установки, промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
SGT-100 [6]	Siemens	5,1	11 945	30.1	Природный газ, жидкое топливо	Газоперекачивающие установки, промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
SGT-50 [6]	Siemens	2	15 148	26	Природный газ	Газоперекачивающие установки, промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
SGT-A05 KB 5S [6]	Siemens	4	12,137	29.7	Природный газ, жидкое топливо	Газоперекачивающие установки, промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
C 1000S [7]	Capstone	1	10900	33	Природный газ, биогаз, пропан-бутан	Промышленные предприятия, ЖКХ, научно-исследовательские стенды
C 800S [7]	Capstone	0,8	10900	33	Природный газ, биогаз, пропан-бутан	Промышленные предприятия, ЖКХ, научно-исследовательские стенды
C 600S [7]	Capstone	0,6	10900	33	Природный газ, биогаз, пропан-бутан	Промышленные предприятия, ЖКХ, научно-исследовательские стенды
C 200S ICHP [7]	Capstone	0,2	10900	33	Природный газ, биогаз, пропан-бутан	Промышленные предприятия, ЖКХ, научно-исследовательские стенды
C 65 [7]	Capstone	0,065	12400	29	Природный газ, биогаз, пропан-бутан	Промышленные предприятия, ЖКХ, научно-исследовательские стенды
C 30 [7]	Capstone	0,030	13800	26	Природный газ, биогаз, пропан-бутан	Промышленные предприятия, ЖКХ, научно-исследовательские стенды

Продолжение таблицы 1

Continuation of Table 1

1	2	3	4	5	6	7
Allison 501-KB 7 [8]	Rolls-Royce	5	-	32,7	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
RR-300 [2]	Rolls-Royce	0,175–0,220	-	-	Жидкое топливо	Авиация, научно-исследовательские стенды
MGT6000–1S [9]	MAN	от 6,63 до 7,8	-	-	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
MGT6000–2S [9]	MAN	6,9 до 8,3 *(механическая)	-	-	Природный газ	Газоперекачивающие установки
THM1304 [9]	MAN	10,0 до 11,5	-	-	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
SGT-50 [10]	FLEX TURBINE	1,88	-	23.4	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
GT1300S [10]	FLEX TURBINE	1,3	-	33	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
GT333S [10]	FLEX TURBINE	0,333	-	33	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
T100 [11]	Turbec	0,1	-	30	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
SATURN 20 (T 1601)[12]	Solar Turbines	1.2	14800	24.3	Природный газ, попутный нефтяной газ	Промышленные предприятия, нефтедобывающая промышленность, мини-ТЭЦ, ЖКХ
CENTAUR 40 (T 4701) [12]	Solar Turbines	3.51	12900	27.8	Природный газ, попутный нефтяной газ	Промышленные предприятия, нефтедобывающая промышленность, мини-ТЭЦ, ЖКХ
CENTAUR 50 (T 6201) [12]	Solar Turbines	4.6	12300	29.3	Природный газ, попутный нефтяной газ	Промышленные предприятия, нефтедобывающая промышленность, мини-ТЭЦ, ЖКХ
TAURUS 60 (T 7901) [12]	Solar Turbines	5.67	11400	31.5	Природный газ, попутный нефтяной газ	промышленные предприятия, нефтедобывающая промышленность, мини-ТЭЦ, ЖКХ
TAURUS 65 (T 8401) [12]	Solar Turbines	6.3	11000	32.9	Природный газ	промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
MARS 100 (T 16002) [12]	Solar Turbines	11.43	11900	33	Природный газ, попутный нефтяной газ	промышленные предприятия, нефтедобывающая промышленность, мини-ТЭЦ, ЖКХ

Продолжение таблицы 1

Continuation of Table 1

1	2	3	4	5	6	7
MKG6M [13]	Mirkon Energy	0,006	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
MKG8M [13]	Mirkon Energy	0,008	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
MKG10MP [13]	Mirkon Energy	0,010	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
MKG15M [13]	Mirkon Energy	0,015	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
MKG21MF [13]	Mirkon Energy	0,017	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
MKG29TF [13]	Mirkon Energy	0,023	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
MKG31T [13]	Mirkon Energy	0,025	-	-	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
Parallon 75 [14]	Honeywell Power Systems	0,075	-	28,5	Природный газ, дизельное топливо, керосин или пропан	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
OP16 [15]	OPRA	1,8	-	26	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
GPB 17D [16]	Kawasaki	1,69	-	26,6	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
GPB70D [16]	Kawasaki	6,74	-	30,2	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
GPB 80D [16]	Kawasaki	7,81	-	33,6	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
DT-4 [17]	Daihatsu	0,4	-	20	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
DT-6 [17]	Daihatsu	0,6	-	22	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
TG401 [17]	Daihatsu	0,3	-	18	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
DT-10 [17]	Daihatsu	1	-	20	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
DT-14 [17]	Daihatsu	1,4	-	21	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
DT-20 [17]	Daihatsu	2	-	21	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
RGT3 [17]	Niigata	0,2	-	28	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
RGT3-1 [17]	Niigata	0,24	-	26,5	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды

Продолжение таблицы 1

Continuation of Table 1

1	2	3	4	5	6	7
RGT3R [17]	Niigata	0,29	-	28,5	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
RGT3C [17]	Niigata	0,3	-	28	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
RGT5R [17]	Niigata	0,4	-	28,5	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
RGT5C [17]	Niigata	0,5	-	28,5	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
RGT8R [17]	Niigata	0,6	-	29,5	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
RGT8C [17]	Niigata	0,8	-	29,5	Природный газ	ЖКХ, научно-исследовательские стенды
NGT2-S [17]	Niigata	1	-	30,5	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
NGT2A-S [17]	Niigata	1,2	-	30,5	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
NGTB 2-S [17]	Niigata	1,6	-	30,5	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
NGT3A-S [17]	Niigata	2	-	30	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
NGT2A-T [17]	Niigata	2,4	-	25,5	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
WJ6G1-GT [17]	ZhuZhou Nanfang Gas Turbine	2	-	23	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ
SGT-200 [17]	ZhuZhou Nanfang Gas Turbine	6,7	-	31,5	Природный газ	Промышленные предприятия, мини-ТЭЦ, ЖКХ

Обзор литературы

Ассортимент зарубежных газотурбинных агрегатов малой мощности имеет широкий диапазон мощностей от 10 МВт и до 15 кВт, что дает возможность их применения в абсолютно разных условиях и для решения различных технологических задач [18–21]. Наиболее распространенными среди них являются обеспечение электрической энергией удаленных объектов, транспортная сфера [22], энергообеспечение небольших предприятий. При этом ведутся разработки машин с еще меньшей мощностью до 3 кВт [23]. Одним из развивающихся направлений применения ГТУ малой мощности за рубежом является компенсация недовыработки электрической энергии возобновляемыми источниками энергии вследствие погодных условий [3, 24], в том числе в виде гибридных установок из газовой турбины и возобновляемого источника [25, 26]. Так, разрабатываются комбинированные энергоустановки, использующие совместный цикл топливного элемента и газовой турбины, который состоит из соединения двух компонен-

тов с помощью теплообменника. В этом случае выхлоп топливного элемента нагревает сжатый воздух в микрогазотурбинном рекуператоре, в то время как предварительный нагрев анодного и катодного газов осуществляется за счет тепла выхлопных газов газовой турбины и тепла, выделяемого при сгорании остаточного топлива, содержащегося в выхлопных газах топливного элемента [27–30]. Исследования в этом направлении ведутся и в России, в том числе сотрудниками Казанского государственного энергетического университета был проведен обзор возможных схем комбинированной энергоустановки типа твердооксидный топливный элемент/газовая турбина. [31] Кроме того, ведутся изыскания в области проектирования газовых турбин малой мощности, работающих на метан-водородном топливе и биогазе [32–36]. Основная концепция для западных стран заключается в децентрализации выработки тепловой и электрической энергии, что по идее должно привести к уменьшению выбросов в атмосферу парниковых газов за счет более тонкого регулирования и более полного использования мощностей [37]. Дополняет данную концепцию использование когенерации, в связи с чем ведутся подобные исследования на экспериментальных стендах [38,39]. Для эффективного анализа результатов от внедрения малых ГТУ разрабатываются различные методики [40]. Диапазон мощностей отечественных газотурбинных машин представлен в исследуемом сегменте 10 МВт – 250 кВт. Многие из отечественных малых ГТУ создаются на основе авиационных газотурбинных двигателей [41], это связано с тем, что в нашей стране в целом наблюдается отставание в области энергетических газотурбинных установок, так как пик их развития пришёлся на кризисные для России 90-ые годы. Кроме того, ведутся различные исследования по разработке новых машин либо использованию оборудования из других отраслей промышленности [42], а также разработка установок с применением зарубежных технологий [43,44]. Существующие же агрегаты могут применяться и, как правило, применяются в различных отраслях промышленности: для привода газоперекачивающих станций, в качестве автономных (резервных) источников собственных нужд производственных предприятий, в качестве экспериментальных стендов для научных исследований. Мы выполнили анализ выпускаемых на данный момент на отечественных предприятиях газовых турбин малой мощности и провели их классификацию по сферам применения.

Малые ТЭС. Одна из сфер применения газовых турбин малой мощности – это строительство малых ТЭС, которые могут работать как в отдельных изолированных энергосистемах, так и в ЕЭС РФ. В настоящее время большое внимание уделяется развитию отдаленных регионов России, таких как Сибирь, Дальний Восток. В данных условиях, когда имеются объективные причины, затрудняющие подключение к ЕЭС РФ, целесообразно строить локальные мини-ТЭС для обеспечения отдельных поселений или предприятий тепловой и электрической энергией [44]. Необходимо отметить, что в центральной части РФ имеет смысл строительство мини-ТЭС. Так, в 2000 году одной из первых в России, в Республике Башкортостан, в районном центре Большеустыкинское, была построена и введена в эксплуатацию газотурбинная электростанция ГТУ-ТЭС «Шигили». Электрическая мощность станции 4 МВт, тепловая 8,2 Гкал/ч [45]. Основным ее назначением является теплоснабжение районного центра, а также повышение надежности электроснабжения как райцентра, так и близлежащих населенных пунктов. При этом встает важная проблема максимальной автоматизации работы оборудования при минимальном количестве задействованного при обслуживании персонала или вообще

с дистанционным управлением. Кроме строительства новых энергообъектов приоритетным является перевод существующих котельных в режим когенерации путем установки газовых турбин малой мощности. Так, перевод котельных на когенерацию в Новосибирской области позволит ввести дополнительные 1500 МВт электрической мощности [46]. Однако крупной проблемой при строительстве малых ТЭЦ является недостаточная проработка нормативной базы [47]. Понятие мини-ТЭЦ как таковое там не прописано, поэтому приходится руководствоваться требованиями ВНТП 81 «Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций» с применением для паротурбинных станций с турбоагрегатами с единичной мощностью 50 МВт и выше [48]. При этом необходимо отметить, что достаточно проблематично на станциях малой мощности предусмотреть все системы и выполнять требования, которые рассчитаны для больших станций. Анализ газотурбинных агрегатов соответствующего назначения приведен в табл. 2.

Производственные предприятия. Производственные предприятия могут использовать газовые турбины малой мощности в качестве автономных источников питания, что в определенных случаях может быть экономически целесообразней, чем покупка электроэнергии из единой

Таблица 2. Газовые турбины малой мощности производства РФ для мини-ТЭЦ

Table 2. Gas turbines low power manufactured in the Russian Federation for mini-CHP

Марка турбины	Мощность электрическая номинальная, МВт	Мощность тепловая номинальная, МВт	КПД (газовой турбины / для комбинированного цикла), %	Вид топлива	Завод изготовитель
ГТЭ-6 [49]	6,0	12,4	23/77,4	Природный газ	«Уральский турбинный завод»
ГТД-6,3РМ/8 [50]	8,38	-	34,5/-	Природный газ	ОДК «Сатурн»
ГТУ-4П [51]	4,13	-	-/80,2	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТУ-6П [51]	6,14	-	-/82,29	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТП-10/953 [52]	8,0	20,7	24/80	Природный газ	ОАО "УМПО"
НК-12СТ [53]	6,3	-	26,1/-	Природный газ	ПАО "ОДК-Кузнецов"
НК-14СТ [53]	8,54	-	32/-	Природный газ	ПАО "ОДК-Кузнецов"
ДО49Р [50]	2,85	-	28/-	Природный газ/дизель	ОДК «Сатурн»
ГТД-6РМ [50]	6,38	-	24,8/-	газ/дизель	ОДК «Сатурн»
ГТД-4РМ [50]	4,14	-	32,5/-	Природный газ	ОДК «Сатурн»
ГТУ-2,5П [51]	2,56	-	-/76,9	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТД-8РМ [50]	8,44	-	25,5/-	газ/дизель	ОДК «Сатурн»

энергетической системы. Либо использовать их в качестве аварийного резерва. В России идут исследования в области утилизации при помощи газовых турбин газообразных побочных продуктов металлургического производства, аналогичные зарубежным работам [54]. В Российской Федерации малые турбины также находят практическое применение для децентрализованного энергоснабжения промышленных предприятий. Так, например, в Тюмени ФОК «Центральный» оборудован микротурбинами Capstone, суммарная электрическая мощность которых составляет 5,5, а завод «Тюменские авиадвигатели» использует в качестве децентрализованного источника энергии конвертированный авиационный газотурбинный двигатель собственного производства [55]. Кроме того, разрабатываются технологические схемы для применения газовых турбин на объектах нефтехимического комплекса [56], а также обсуждаются варианты применения децентрализованных установок с малыми газовыми турбинами на биогазе для сельского хозяйства [57, 58]. Варианты ГТУ, подходящих для данных целей, представлены в табл. 3.

Лабораторные стенды. Для проведения научных исследований в области изучения процессов и режимов работы газотурбинных установок наиболее подойдут газовые турбины, производимые ОАО «Калужский двигатель». Ввиду малой мощности (даже относительно других машин данной категории) и малых габаритов эти агрегаты наиболее подходящие для создания экспериментальных стендов в лабораторных условиях. Характеристики данных турбин приведены в табл. 4.

Газоперекачивающие установки. Газовые турбины малой мощности применяются в нефтегазовой промышленности для привода газоперекачивающих агрегатов. Применение такого

Таблица 3. Газовые турбины малой мощности производства РФ для промышленности

Table 3. Low-power gas turbines manufactured in the Russian Federation for industry

Марка турбины	Мощность электрическая номинальная, МВт	КПД (газовой турбины / для комбинированного цикла), %	Вид топлива	Завод изготовитель
НК-12СТ [53]	6,3	26,1/-	Природный газ	ПАО "ОДК-Кузнецов"
НК-14СТ [53]	8,54	32/-	Природный газ	ПАО "ОДК-Кузнецов"
ДО49Р [50]	2,85	28/-	Природный газ/ дизель	ОДК «Сатурн»
ГТД-6РМ [50]	6,38	24,8/-	Природный газ/ дизель	ОДК «Сатурн»
ГТУ-2,5П [51]	2,56	-/76,9	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТЭ-6 [49]	6,0	23/77,4	Природный газ	«Уральский турбинный завод»
ГТД-4РМ [50]	4,14	32,5/-	Природный газ	ОДК «Сатурн»
ГТУ-4П [51]	4,13	-/80,2	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТУ-6П [51]	6,14	-/82,29	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»

Таблица 4. Газовые турбины малой мощности производства РФ для лабораторных стендов

Table 4. Low-power gas turbines manufactured in the Russian Federation for laboratory stands

	МСУ-800 [59]	ГТД-0,2 [59]
Номинальная мощность на валу, кВт	860	250
Номинальная частота вращения об/мин:		
-силовой турбины	24684	46000
-выходного вала	1500, 1900	1500, 1900
Температура выхлопных газов при Nном	514	506
КПД	27 %	20 %
Топливо	дизель, керосин, природный газ, сжиженный газ	дизель, керосин, природный газ, сжиженный газ
Давление газообразного топлива на входе, кг/см ²	15	9
Удельный расход жидкого топлива, кг/кВт*ч	0,322	0,529
Удельный расход газообразного топлива, кг/кВт*ч	0,270	0,365
Ресурс до капитального ремонта, ч	25000	25000
Габариты, мм	1914×1097×945	1270×765×900
Масса, кг	950	300

типа привода обосновывается удалённостью газовых месторождений от крупных источников энергии, что делает применение напрямую газотурбинного привода эффективнее электрического. Турбины для привода газоперекачивающих агрегатов приведены в табл. 5.

Область ЖКХ. Одна из возможных областей применения газовых турбин малой мощности – ЖКХ. Обеспечение отдельных жилых зданий, жилых комплексов или микрорайонов тепловой и электрической энергией является вполне подходящей задачей для использования маломощных ГТУ. В данном случае обеспечивается возможность плавного регулирования тепловых нагрузок в зависимости от изменения погодных условий.

Тепловая нагрузка, необходимая для нужд отопления типового 9-этажного дома, может быть определена по уравнению:

Таблица 5. Газовые турбины малой мощности производства РФ для газоперекачивающих установок

Table 5. Low-power gas turbines manufactured in the Russian Federation for gas pumping plants

Марка турбины	Мощность номинальная МВт	КПД, %	Вид топлива	Расход топлива (на номинальном режиме), кг/час	Завод изготовитель
ГТД-4РМ [50]	4.14	32.5	Природный газ	900	ОДК «Сатурн»
ГТД-6.3РМ [50]	6.45	32.5	Природный газ	1400	ОДК «Сатурн»
ГТД-6.3РМ/8 [50]	8.38	34.5	Природный газ	1730	ОДК «Сатурн»
ГТГ-1500–2 [60]	1,5	-	Природный газ	523,5	ОАО "Пролетарский завод"

$$Q_{от} = X_{от} V (t_{вн}^p - t_{н}^p), \quad (1)$$

где $Q_{от}$ – тепловая нагрузка на нужды отопления, $X_{от}$ – отопительная характеристика здания, V – объем здания, $t_{вн}^p$ и $t_{н}^p$ – расчетные температуры

$$\begin{aligned} Q_{от} &= 0,319 \cdot 13,3 \cdot 25,2 \cdot 27 \cdot (22 - (-30)) = \\ &= 150,11 \text{ кВт} \approx 0,13 \text{ Гкал/ч} \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда для обеспечения тепловой энергией одного такого дома можно использовать зарубежную турбину С65 с тепловой мощностью 0,141 Гкал/ч производства Capstone, а турбина С800 с тепловой мощностью 1,356 Гкал/ч может обеспечить теплом уже жилой комплекс из 10 таких домов. Отечественная турбина ГТЭ-10/95М с отпуском теплоты 17,8 Гкал/ч может обеспечить теплом целый микрорайон из 137 таких домов. Весь перечень турбин отечественного производства, подходящих для нужд ЖКХ, представлен в табл. 6.

Данная тематика является крайне актуальной, и различными специалистами разрабатываются схемы применения малых газовых турбин в отрасли ЖКХ [61]. При этом существуют и проблемы в виде отсутствия работающих экономических механизмов и мер, стимулирующих развитие малой энергетики, в том числе механизмов тарифной поддержки

Таблица 6. Газовые турбины малой мощности производства РФ для ЖКХ

Table 6. Low-power gas turbines manufactured in the Russian Federation for housing and communal services

Марка турбины	Мощность электрическая номинальная, МВт	Мощность тепловая номинальная, МВт	КПД (газовой турбины/для комбинированного цикла), %	Вид топлива	Завод изготовитель
ГТУ-4П [51]	4,13	-	-/80,2	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТУ-6П [51]	6,14	-	-/82,29	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
НК-12СТ [53]	6,3	-	26,1/-	Природный газ	ПАО «ОДК-Кузнецов»
ДО49Р [50]	2,85	-	28/-	Природный газ/дизель	ОДК «Сатурн»
ГТД-6РМ [50]	6,38	-	24,8/-	газ/дизель	ОДК «Сатурн»
ГТД-4РМ [50]	4,14	-	32,5/-	Природный газ	ОДК «Сатурн»
ГТУ-2,5П [51]	2,56	-	-/76,9	Природный газ, попутный нефтяной газ, жидкое топливо	ОДК «Авиадвигатель»
ГТГ-1500–2П [60]	1,5	-	-/-	Природный газ	ОАО «Пролетарский завод»
МСУ-800 [59]	0,86	-	27/-	дизель, керосин, природный газ, сжиженный газ	ОАО «Калужский двигатель».
ГТД-0,2 [59]	0,25	-	20/-	дизель, керосин, природный газ, сжиженный газ	ОАО «Калужский двигатель».

малой генерации в сфере ЖКХ, в итоге нет заказчика на использование малой генерации в ЖКХ [62].

Выводы

1. Имеется общемировая тенденция к развитию децентрализованного энергоснабжения с применением газовых турбин малой мощности.
2. Спектр применения газовых турбин малой мощности достаточно обширен и имеет широкие перспективы дальнейшего развития.
3. Производство ГТУ малой мощности в Российской Федерации развито меньше, чем за рубежом, однако имеет потенциал для развития, особенно в условиях санкций.
4. Внедрению децентрализованных энергетических установок в РФ, с одной стороны, способствуют климатические и географические условия страны, а с другой стороны, препятствуют недостаточно проработанные экономические, нормативно-правовые и административные механизмы регулирования данной сферы.

Список литературы / References

- [1] Vandervort C. Advancements in H class gas turbines and combined cycle power plants. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition GT2018*. Oslo, Norway, 2018, 1–10.
- [2] Jansohn P. *Modern Gas Turbine Systems*, Switzerland, Woodhead Publishing Limited, 2013, p. 838.
- [3] Aslanidou I., Rahman M., Zaccaria V., Kyprianidis K. G. Micro Gas Turbines in the Future Smart Energy System: Fleet Monitoring, Diagnostics, and System Level Requirements, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2021, 7, 1–14.
- [4] Pilavachi P. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power, *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22 (18), 2003–2014.
- [5] Gimelli A., Sannino R. Thermodynamic model validation of Capstone C 30 micro gas turbine, *Energy Procedia*, 2017, 126, 955–962.
- [6] Siemens energy [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html> – заглавие с экрана [Siemens energy [Electronic resource] – Access: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines.html>
- [7] Микротурбины Capstone. Официальный сайт. [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bimtec.ru/> – заглавие с экрана [Capstone microturbines. Official website. [electronic resource] – Access: <https://bimtec.ru/>
- [8] Rolls-Royce plc [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx> – заглавие с экрана [Rolls-Royce plc [Electronic resource] – Access: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx>
- [9] MAN Energy Solutions gas turbines [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.man-es.com/oil-gas/products/gas-turbines> – заглавие с экрана [MAN Energy Solutions gas turbines [Electronic resource] – Access: <https://www.man-es.com/oil-gas/products/gas-turbines>

[10] Flex Energy Solutions [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.flexenergy.com/power-solutions/turbine-innovations/> – заглавие с экрана [Alex Energy Solutions [Electronic resource] – Access: <https://www.flexenergy.com/power-solutions/turbine-innovations/>

[11] РосТепло. Микротурбина Turbес Т100. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.rosteplo.ru/katalog/5/77/126> – заглавие с экрана [RosTeplo. Turbес T100 microturbines. [Electronic resource] – Access: <https://www.rosteplo.ru/katalog/5/77/126>

[12] Новая генерация. Электростанции Solar Turbines (Солар Турбайнз) – газотурбинные установки [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://manbw.ru/analitycs/solar.html> – заглавие с экрана [New generation. Solar Turbines power plants – gas turbine installations [Electronic resource] – Access: <https://manbw.ru/analitycs/solar.html>

[13] ЭНЕРГОПРОФ. Газовые генераторы Mikron Energy [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.skklad-generator.ru/elektrostantsii/gazovye/mirkon-energy> – заглавие с экрана [ENERGOPROF. Micron Energy gas generators [Electronic resource] – Access: <https://www.skklad-generator.ru/elektrostantsii/gazovye/mirkon-energy>

[14] Микротурбины Honeywell Power [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://cogeneration.ru/honeywell/parallon_75.html – заглавие с экрана [Honeywell Power microturbines [Electronic resource] – Access: https://cogeneration.ru/honeywell/parallon_75.html

[15] OPRA. Gas Turbine [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.opra.energy/gas-turbine/> – заглавие с экрана [OPRA. Gas Turbine [Electronic resource] – Access: <https://www.opra.energy/gas-turbine/>

[16] ZAVODAGT. Газовые турбины Kawasaki [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://zavodagt.ru/gazovye-turbiny-kawasaki> – заглавие с экрана [ZAVODAGT. Kawasaki gas turbines [Electronic resource] – Access: <http://zavodagt.ru/gazovye-turbiny-kawasaki>

[17] Каталог энергетического оборудования –2017 «Турбины и дизели», главный редактор Капралов Д. А., отпечатано ИП Голубин А. М. г. Рыбинск, 704 с. [Catalog of power equipment –2017 “Turbines and diesel engines”, editor-in-chief Kapralov D. A., printed by IP Golubin A. M. Rybinsk, p. 704. (in Russian)]

[18] Rist J. F., Dias M. F., Palman M., Zelazo D., Cukurel B. Economic Dispatch of a Single Micro-gas Turbine under Chp Operation, *Applied Energy*, 2017, 200, 1–18

[19] Cameretti MC, Tuccillo R. Combustion features of a bio-fuelled micro-gas turbine. *Applied Thermal Engineering* 2015, 8,:280–290.

[20] Decuypere R., Verstraete D. Micro Turbines from the Standpoint of Potential Users, *Micro Gas Turbines*, 2005, 15, 1–14.

[21] Karvountzis-Kontakiotis A., Andwari A.M., Pesyridis A., Russo S., Tuccillo R., Esfahanian V. Application of Micro Gas Turbine in Range-Extended Electric Vehicles, *Energy*, 147, 2018, 351–361.

[22] Jia F., Zhang X., Dub F., Ding S., Zhao Y., Xu Z., Wang Y., Zhou Y. Experimental and numerical investigation on micro gas turbine as a range extender for electric vehicle, *Applied Thermal Engineering*, 173, 2020, 115–236.

[23] Visser W.P.J., Shakariyants S.A., Oostveen M. (2011). Development of a 3kW Microturbine for CHP Applications, *Journal of Engineering Gas Turbines and Power*, 2011, 133, 042301–1–042301–8.

- [24] Banihabib R., Assadi M. The Role of Micro Gas Turbines in Energy Transition, *Energies*, 2022, 15 (21), 1–22
- [25] Degobert Ph., Kreuawan S., Guillaud X. Micro-grid powered by photovoltaic and micro turbine. *International Conference on Renewable Energies*. France, 2006, 1 (4), 188–191.
- [26] Camerettia M. C., Langellaa G., Sabinoa S., Tuccilloa R. Modeling of a hybrid solar micro gas-turbine power plant, *Energy Procedia*, 2015, 82, 833–840
- [27] Bohn D. Micro Gas Turbine and Fuel Cell: A Hybrid Energy Conversion System with High Potential, *Micro Gas Turbines*, 2005, 13, 1–46.
- [28] Xiao G., Yang T., Liu H., Ni D., Ferrari M. L., Li M., Luo Z., Cen K., Ni M. Recuperators for micro gas turbines: A review, *Applied Energy*, 2017, 197, 83–99.
- [29] Simon T. W., Jiang N. Micro- or Small- Gas Turbines. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003*. Tokyo, 2003, 1–15.
- [30] Bakalis D.P., Stamatis A.G. Incorporating available micro gas turbines and fuel cell: Matching considerations and performance evaluation, *Applied Energy*, 2013, 103, 607–617.
- [31] Филимонова А. А., Чичириов А. А., Чичириова Н. Д., Печенкин А. В. Обзор проектных схем гибридных систем с твердооксидным топливным элементом и газовой турбиной для комбинированного производства тепла и электроэнергии. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 15. № 7, 812–834. [Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Pechenkin A. V. Overview of design schemes of hybrid systems with a solid oxide fuel cell and a gas turbine for combined heat and power generation. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology*. 2022. Vol. 15. No. 7, 812–834. (in Russian)]
- [32] di Gaeta A., Reale F., Chiariello F., Massoli P. A Dynamic Model of a 100 Kw Micro Gas Turbine Fuelled with Natural Gas and Hydrogen Blends and its Application in a Hybrid Energy Grid, *Energy*, 2017, 129, 299–320.
- [33] Langston L. S. Hydrogen Fueled Gas Turbines, *Mechanical Engineering*, 2019, 141 (03), 52–54.
- [34] Kosoi A. S., Popel O. S., Beschastnykh V. N., Sinkevich M. V. Small Gas-Turbine Units for the Power Industry: Ways for Improving the Efficiency and the Scale of Implementation, *Thermal Engineering*, 2017, 64 (10), 723–728.
- [35] Rasul M. G., Ault C., Sajjad M. Bio-gas Mixed Fuel Micro Gas Turbine Co-Generation for Meeting Power Demand in Australian Remote Areas, *Energy Procedia*, 2015, 75, 1065–1071.
- [36] Nikpey H., Assadi M., Breuhaus P., Morkved P. T. Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas, *Applied Energy*, 2014, 117, 30–41.
- [37] Ezzat M. F., Dincer I. Energy and exergy analyses of a novel ammonia combined power plant operating with gas turbine and solid oxide fuel cell systems, *Energy*, 2020, 194, 116750
- [38] Caresana F., Comodi G., Pelagalli L., Renzi M., Vagni S. Use of a test-bed to study the performance of micro gas turbines for cogeneration applications, *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31, 3552–3558.
- [39] Ho C., Chua K. J., Chou S. K. Performance study of a microturbine system for cogeneration application J, *Renewable Energy*, 2004, 29, 1121–1133.

[40] Yazdi B. A., Yazdi B. A., Ehyaei M. A., Ahmadi A. Optimization of micro combined heat and power gas turbine by genetic algorithm, *Thermal science*, 2015, 19 (1), 207–218.

[41] Kraev V.M., Tikhonov A.I. Conversion of Low-Thrust Airplane Gas-Turbine Engines to Power Generators, *Russian Engineering Research*, 2018, 38 (7), 536–539.

[42] Gusarova V. A., Godzhaev Z. A. Development of Low-Power Gas Turbine Plants for Use at Industrial Facilities, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, 47 (6), 500–506.

[43] Shubina A. S., Marin G. E., Akhmetshin A. R. Study of the Possibility of Creating Autonomous Low-Power Thermal Power Plants Using Alternative Energy Sources, *International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021)*. Vladivostok, Russia, 2021, 2096, 1–9.

[44] Опыт внедрения и эксплуатации ГТУ малой мощности [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=794 – заглавие с экрана [Experience in the implementation and operation of low-power GTU [Electronic resource] Access: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=794

[45] Щаулов В. Ю. Опыт внедрения и эксплуатации ГТУ малой мощности: материалы Конференции «Малые и средние ТЭЦ. НП “Российское теплоснабжение” Современные решения», 7–9 сентября 2005 г. [Shchaulov V. Yu., Experience of implementation and operation of low-power GTU Materials of the Conference “Small and medium-sized CHP plants. NP “Russian heat supply” Modern solutions”, September 7–9, 2005 (in Russian)]

[46] Чурашев В. Н. Каким быть энергообеспечению Новосибирской области? Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью»: сб. материалов в 3 т. Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г. Т. 3. 60–65 [Churashev V.N. What should be the energy supply of the Novosibirsk region? Interexpo GEO-Siberia-2016. XII International Scientific Conference: International Scientific Conference “Economic Development of Siberia and the Far East. Economics of nature management, land management, forest management, real estate management”: collection of materials in 3 t. Novosibirsk, April 18–22, 2016, vol. 3. 60–65(in Russian)]

[47] Петрущенко В. А., Коршакова И. А. Качественный и количественный анализ тепловой энергетики малых мощностей в России. *Проблемы энергетики*, 2020, том 22, № 5, 52–70. [Petrushchenkov V.A., Korshakova I.A. Qualitative and quantitative analysis of thermal energy of small capacities in Russia. *Problems of Energy*, 2020, volume 22, No. 5, 52–70. (in Russian)]

[48] Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций ВНТП 81 Утверждены. Протокол научно-технического Совета Минэнерго СССР от 17 августа 1981 г. № 99 по согласованию с Госстроем СССР письмо № АБ-3430–20/4 от 29.06.81. [The norms of technological design of thermal power plants VNTP 81 have been approved. Protocol of the Scientific and Technical Council of the Ministry of Energy of the USSR dated August 17, 1981 No. 99 in coordination with the USSR State Construction Committee letter No. AB-3430–20/4 dated 06/29/81.]

[49] ССpowerplant. Газовая турбина ГТЭ-6 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ccpowerplant.ru/gazovaya-turbina-gte-6/> – заглавие с экрана [CCpowerplant. Gas turbine GTE-6 [Electronic resource] – Access: <https://ccpowerplant.ru/gazovaya-turbina-gte-6/>

[50] ПАО «ОДК-САТУРН» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://uec-saturn.ru> – заглавие с экрана [PJSC “UEC-SATURN” [Electronic resource] – Access: <http://uec-saturn.ru>

[51] ОДК «Авиадвигатель» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.avid.ru/energy/> – заглавие с экрана [UEC “Aviadvigatel”] [Electronic resource] – Access: <https://www.avid.ru/energy/>

[52] УМПО ОДК [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.umpro.ru/> – заглавие с экрана [УМПО УЕС [Electronic resource] – Access: <https://www.umpro.ru/>

[53] ПАО «ОДК-Кузнецов» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kuznetsov-motors.ru/produktsiya> – заглавие с экрана [PJSC “UEC-Kuznetsov”] [Electronic resource] – Access: <https://kuznetsov-motors.ru/produktsiya>

[54] Luessen H.P. Gas turbine technology for steel mill gas and syngas applications General Electric Company. *The International Gas Turbine and Aeroengine Congress and exhibition*, Orlando, Florida, 1997, 1–9.

[55] Белкин А. П., Дубова А. В. Выбор технологии децентрализованного энергоснабжения предприятий тюменской области, «*Инновационные технологии устойчивого развития*», 2015, Выпуск 4, 46–53. [Belkin A. P., Dubova A. V. The choice of technology for decentralized energy supply of enterprises of the Tyumen region, “*Innovative technologies of sustainable development*”, 2015, Issue 4, 46–53. (in Russian)]

[56] Сладковский Д. А., Кузичкин Н. В. Энергосберегающие схемы теплоэлектроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий на базе газотурбинных технологий, *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 2012, 1–3 [Sladkovsky D. A., Kuzichkin N. V. Energy-saving schemes of heat and power supply of oil refineries based on gas turbine technologies, *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2012, 1–3(in Russian)]

[57] Стребков Д. С., Тихомиров А. В. Вестник Направления повышения эффективности использования энергоресурсов в животноводстве, *ВНИИМЖ* № 2(10)-2013, 26–34 [Strebkov D. S., Tikhomirov A. V. Bulletin of the direction of improving the efficiency of energy use in animal husbandry, *VNIIMZH* No.2(10)-2013, 26–34 (in Russian)]

[58] Матрунчик А. С. Потенциал использования биоэнергетики на животноводческих фермах России, «*Вопросы современной науки и практики*» УНИВЕРСИТЕТ им. В.И. ВЕРНАДСКОГО, 2015, № 2(56), 22–27. [Matrunchik A. S. The potential of using bioenergy on livestock farms in Russia, “*Issues of modern science and practice*” V.I. VERNADSKY UNIVERSITY, 2015, № 2(56), 22–27 (in Russian)]

[59] Газотурбинная техника ПАО «Кадви» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gtes.kadvi.ru/power-module/silovoj-modul-gtd-02/> – заглавие с экрана [Gas turbine equipment of PJSC “Kadvi”] [Electronic resource] – Access: <http://gtes.kadvi.ru/power-module/silovoj-modul-gtd-02/>

[60] ПАО Пролетарский завод [Электронный ресурс] – Режим доступа: – https://proletarsky.ru/product_catalog/1_ заглавие с экрана [PJSC Proletarian Plant] [Electronic resource] – Access: https://proletarsky.ru/product_catalog/1

[61] Вдовенко И. А., Некрасов Д. О. Оценка эффективности применения газотурбинной установки ГТЭ-004 в системе энергоснабжения, «*СИМВОЛ НАУКИ*», 2015 № 5, 22–24 [Vdovenko I. A., Nekrasov D. O. Evaluation of the effectiveness of the GTE-004 gas turbine installation in the power supply system, “*SYMBOL OF SCIENCE*”, 2015 No. 5, 22–24 (in Russia)]

[62] Чурашев В.Н., Маркова В.М. Мини-ТЭЦ – перспективное направление развития энергетики Новосибирской области, *Актуальные проблемы развития Новосибирской области и пути их решения Часть I Проблемы и перспективы экономического развития новосибирской области сборник научных трудов Под редакцией д.э.н. А.С. Новоселова, к.э.н. А.П. Кулаева*, Новосибирск 2014, 138–161 [Churashev V.N., Markova V.M. Mini-CHP – a promising direction of energy development of the Novosibirsk region, *Actual problems of development of the Novosibirsk region and ways to solve them Part I Problems and prospects of economic development of the Novosibirsk region collection of scientific papers Edited by Doctor of Economics A.S. Novoselov, Candidate of Economics A.P. Kulaev*, Novosibirsk 2014, 138–161 (in Russian)]