

ТУРБОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ СХЕМ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. И. С. Сербин^а, Ю. Г. Савинченко^а, О. О. Мильман^{б, с}, В. М. Толкачёв^{б, *}

^аОАО “Калужский турбинный завод”, Московская ул., д. 241, г. Калуга, 248010 Россия

^бЗАО НПВП “Турбокон”, ул. Комсомольская Роцца, д. 43, г. Калуга, 248010 Россия

^сКалужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
ул. Степана Разина, д. 26, г. Калуга, 248023 Россия

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

Поступила в редакцию 12.10.2020 г.

После доработки 28.10.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

Представлено описание энергосберегающей технологии выработки электрической энергии при надстройке паровых котельных турбогенераторными установками (ТГУ) с противодавленческими турбинами, работающими параллельно с редуцированными охладительными установками. Приведены характеристика и описание ТГУ для распределенной энергетики, разработанных на ОАО КТЗ, с противодавленческими турбинами и конденсационными турбинами с отборами и без отборов пара, поверхностными и воздушными конденсаторами, мини-ТЭЦ со встроенными бойлерами для подогрева сетевой воды. Описаны ТГУ для геотермальной энергетики с выхлопом турбин в атмосферу или на станции теплоснабжения, с конденсационными турбинами с воздушными конденсаторами. Приведены технические характеристики ТГУ различных типов, количество выпущенных установок и места их эксплуатации. Отмечены конструктивные особенности ТГУ, изготовленных в ОАО КТЗ: блочная компоновка, 100%-ная заводская готовность, высокая степень автоматизации, надежность при эксплуатации. Показаны перспективы дальнейшего развития направления турбогенераторных установок для распределенной энергетики: разработка и поставка конденсационных и противодавленческих ТГУ мощностью, увеличенной до 8 МВт; расширение номенклатуры “приключенных” ТГУ, работающих на паре из отборов или выхлопа основных турбин, позволяющих компенсировать сезонные или технологические колебания потребления тепловой энергии и обеспечивающих более эффективную работу основных турбин; разработка бинарных установок, использующих низкопотенциальное тепло и работающих на низкокипящих органических теплоносителях. Отмечена высокая эффективность распределенной энергетики в сочетании с когенерацией.

Ключевые слова: турбина, генератор, распределенная энергетика, компоновка, противодавление, мощность, бинарный цикл, конденсатор, теплоснабжение, потребление тепловой энергии, органические теплоносители

DOI: 10.1134/S0040363621130038

С начала 90-х годов прошлого века в связи с повышением цен на электроэнергию резко увеличился интерес к генерирующим установкам для стационарной распределенной энергетики. Наиболее востребованными оказались генерирующие установки малой мощности с противодавленческими турбинами, работающими по наиболее экономичной когенерационной схеме. Сотрудники созданного в начале 90-х годов Научно-производственного внедренческого предприятия “Турбокон”, работающего в содружестве с ОАО КТЗ, после обследования большого числа промышленных и муниципальных паровых котельных в различных регионах России предложили

исключить неоправданные потери при дросселировании свежего пара в котельных с помощью ТГУ малой мощности с противодавлением. Такие установки вырабатывают электроэнергию на базе теплового потребления и выполняют роль редуциционно-охладительных устройств по снижению параметров для тепловых потребителей. На рис. 1 представлена схема котельной с ТГУ [1].

Поскольку энтальпия отработавшего в турбине пара ниже, чем после простого дросселирования, для сохранения тепловой энергии, необходимой потребителю, нужно увеличить расход топлива в котел примерно на 5.4% при номинальной элект-

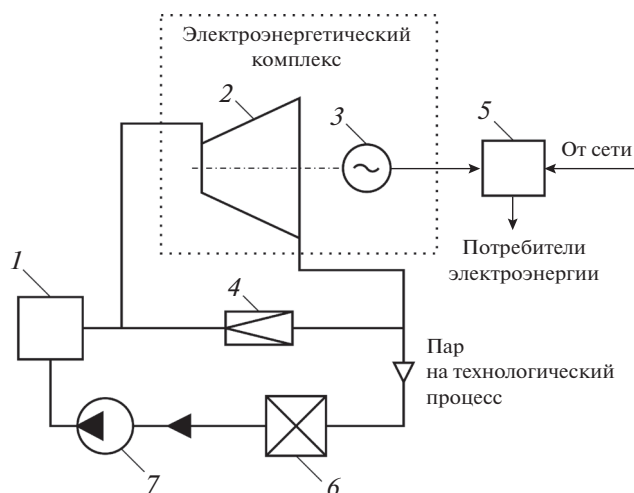


Рис. 1. Принципиальная схема котельной со встроенной турбогенераторной установкой для производства электроэнергии.

1 – котел; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – редукционно-охлаждающее устройство; 5 – распределительное устройство 380–6300 В; 6 – потребители пара; 7 – насос

трической нагрузке и включении в работу турбогенераторной установки. Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии при этом составит 160 г у.т./($\text{кВт} \cdot \text{ч}$).

Схема энергетических потоков котельной с электроэнергетической надстройкой представлена на рис. 2 [1]. Расчетные характеристики, показанные на этом рисунке, были подтверждены энергетическими испытаниями турбогенераторной установки мощностью 500 кВт, размещенной в котель-

ной АО «Калужский завод «Ремпутьмаш»» [1]. Стоимость дополнительно израсходованного топлива покрывается разницей между стоимостью электроэнергии, приобретаемой у сетевых компаний, и себестоимостью электроэнергии, произведенной на ТГУ.

ТУРБОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ТИПА «КУБАНЬ» ДЛЯ НАДСТРОЙКИ ПАРОВЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Первым заказчиком, заинтересовавшимся этой энергосберегающей технологией, была Южно-Российская энергетическая компания (г. Краснодар). По наименованию региона-заказчика турбогенераторная установка электрической мощностью 500 кВт и напряжением 400 В была названа «Кубань-0.5» [2]. В дальнейшем мощность ТГУ была расширена до 1.5 МВт. К 2015 г. было изготовлено 75 установок этого типа суммарной электрической мощностью 59 МВт. Их основным потребителем кроме России стала Республика Беларусь.

Установка типа «Кубань» представляет собой блок 100%-ной заводской готовности, состоящий из рамы-маслобака с размещенными на ней высокооборотной турбиной активного типа, одноступенчатым редуктором с шевронным зацеплением и генератором, соединенными между собой зубчатыми муфтами. Кроме того, на ней установлены узлы системы маслоснабжения с погружным масляным насосом, блоки регулирования и защиты, шкафы с электрооборудованием и контрольно-измерительными приборами, блок-эжектор. Общий вид установки показан на рис. 3.

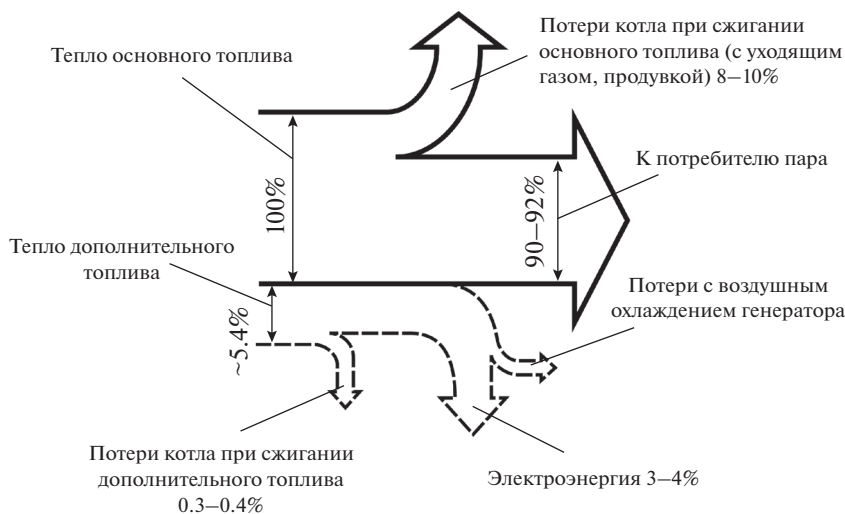


Рис. 2. Схема энергетических потоков котельной со встроенной энергетической надстройкой

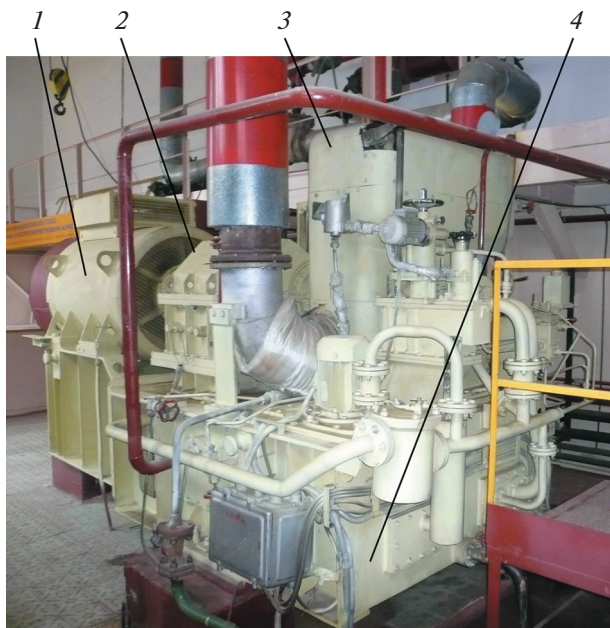


Рис. 3. Турбогенераторная установка «Кубань-0.5А3» в котельной АО «Калужский завод «Ремпутьмаш»». 1 – генератор; 2 – редуктор; 3 – турбина; 4 – рама-маслобак

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТГУ ОАО КТЗ ДЛЯ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Специалисты ЗАО НПВП «Турбокон» и ОАО КТЗ разработали проекты для малой распределенной энергетики на промышленных предприятиях, объектах жилищно-коммунального хозяйства и геотермальной энергетики (геотермики) с турбогенераторными установками электрической мощностью 0.5–8.0 МВт различного типа: с противодавленческими и конденсационными турбина-

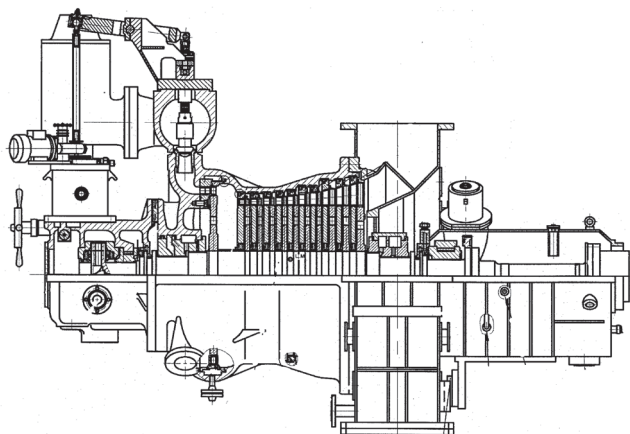


Рис. 4. Паровая турбина турбогенераторной установки типа ТГ 3.5

ми, со встроенными бойлерами (мини-ТЭЦ), с воздушными конденсаторами и тепловыми станциями (для геотермики). По существу, при активном взаимодействии специалистов НПВП «Турбокон» и КТЗ в 90-е годы прошлого века был сформирован рынок энергосберегающих установок на базе когенерации и распределенной энергетики.

На Калужском турбинном заводе за два десятилетия было изготовлено более 150 различных ТГУ для распределенной энергетики общей мощностью 280 МВт, давлением пара 0.5–4.0 МПа, температурой – от температуры сухого насыщенного пара до 440°С. В установках используются турбины активного типа, сопловое или дроссельное парораспределение в зависимости от объемов пара и возможных режимов работы, гидродинамическое регулирование, а в перспективных разработках – микропроцессорное электромеханическое.

Отличительными особенностями турбогенераторных установок ОАО КТЗ являются легкие тонкостенные корпуса и изящные роторы с узкими ступицами автофретированных дисков турбин (рис. 4), компактные передние подшипники, в которых скомпонованы в один узел насос-регулятор и упорный подшипник (рис. 5), оригинальная система гидравлического регулирования, гибкие опоры. Эти и другие конструктивные решения обеспечивают компактность, быстрый прогрев при пусках, надежность при эксплуатации, хорошие

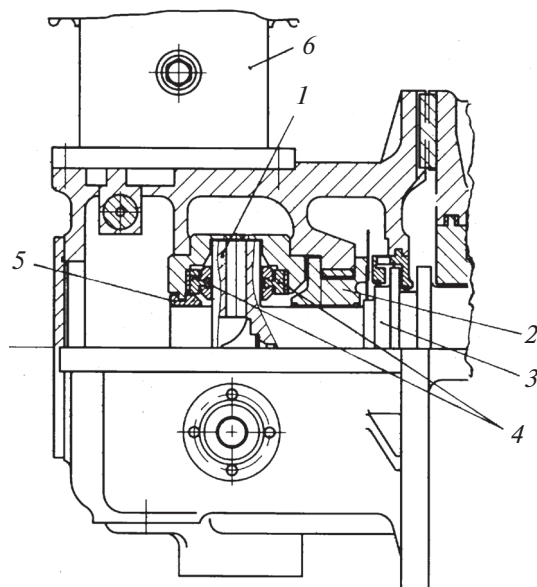


Рис. 5. Типовой передний подшипник турбин малой мощности ОАО КТЗ. 1 – насос-регулятор; 2 – опорный подшипник; 3 – вал ротора турбины; 4 – упорный подшипник; 5 – плавающее уплотнительное кольцо; 6 – блок регулирования

Характеристики генераторов турбогенераторных установок

Генератор	$N_э$, МВт	n , мин ⁻¹	U , В	Изготовитель
МСК	0.5–1.8	1500	400	ПАО “Силовые машины”, Санкт-Петербург
СГ2-500	0.50	1500	400	ООО “Русэлпром-СЭЗ”, г. Сафоново
СГ2-750	0.75	1500	10 500 или 6300	То же
ТК	1.5–8.0	3000	10 500 или 6300	ООО “Электротяжмаш-Привод”, г. Лысьва
ТТК	1.5–8.0	3000	10 500 или 6300	То же
ТПС	1.5–8.0	3000	10 500 или 6300	ООО НПО ПЭЗ, Санкт-Петербург
DSG	0.6	1500	400	ТО AVK, Германия
DSG	1.25	1500	400	То же
LSAS2	1.0	1500	10 500 или 6300	Leroy Somer, Франция

Примечание. $N_э$ – электрическая мощность; n – частота вращения ротора генератора; U – напряжение. Два значения напряжения соответствуют двум вариантам напряжения генератора (указываются по условиям эксплуатации объекта при его заказе).

массогабаритные характеристики. Блочная компоновка при 100%-ной заводской готовности облегчает монтаж оборудования и обеспечивает быстрый ввод в эксплуатацию.

Турбогенераторные установки имеют высокую степень автоматизации. С начала 2000-х годов они комплектуются локальной системой контроля, управления и диагностики СКУД ИТ14, разработанной и изготовленной в НПП “Измерительные технологии” (г. Саров), которая обеспечивает:

непрерывную или по вызову обслуживающего персонала индикацию текущих или измеренных параметров;

накопление и отображение ретроспективной информации о параметрах и звуковую предупредительную сигнализацию при отклонении их значений от заданных;

аварийную звуковую и световую сигнализацию с запоминанием первичного сигнала в случае срабатывания защит;

возможность управления механизмами установки и стыковки с АСУ ТП электростанции.

Система ИТ-14 хорошо зарекомендовала себя в эксплуатации.

Турбогенераторные установки комплектовались синхронными генераторами, характеристики которых приведены в таблице.

ТУРБОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ СХЕМЫ

Наиболее востребованными, помимо ТГУ серии “Кубань”, оказались турбогенераторные установки типа ТГ 3.5, изготовленные на базе установок для атомных ледоколов в виде трех основных блоков:

противодавленческая многоступенчатая турбина и генератор (частота вращения ротора 3000 мин⁻¹) на единой раме;

маслобак с оборудованием маслосистемы; блок-эжектор.

Мощность этих установок составляет 2–4 МВт, по состоянию на 2019 г. изготовлено 27 ТГК суммарной электрической мощностью около 90 МВт.

Интересны установки со встроенными бойлерами (мини-ТЭЦ), предназначенные для выработки электроэнергии и подогрева сетевой воды благодаря исключительной компактности, 100%-ной заводской готовности и возможности размещения в небольших помещениях. Они поставлены в Белоруссию, Латвию, Данию. Установка ТГ 0.6/0.4-2.8 (рис. 6) была поставлена в 1997 г. в Данию на мусоросжигательный завод и многие годы работала в нетипичном для паровой турбины режиме – с отключением на ночь и выходные дни.

Успешный опыт реализации когенерационной схемы выработки электроэнергии получен на предприятии ЗАО “Куйбышев-Азот” (г. Тольятти). Турбогенераторная установка мощностью 6 МВт с противодавленческой турбиной ПР-6-3.4/1.5 (рис. 7), установленная в 2003 г. в технологическом цикле производства минеральных удобрений, за 17 лет эксплуатации выработала более 780 ГВт · ч дешевой электроэнергии.

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Отдельные установки распределенной энергетики – геотермальные, особенность конструкции которых связана с высокой минерализацией геотермального пара и значительным содержанием сероводорода в атмосфере, что накладывает огра-

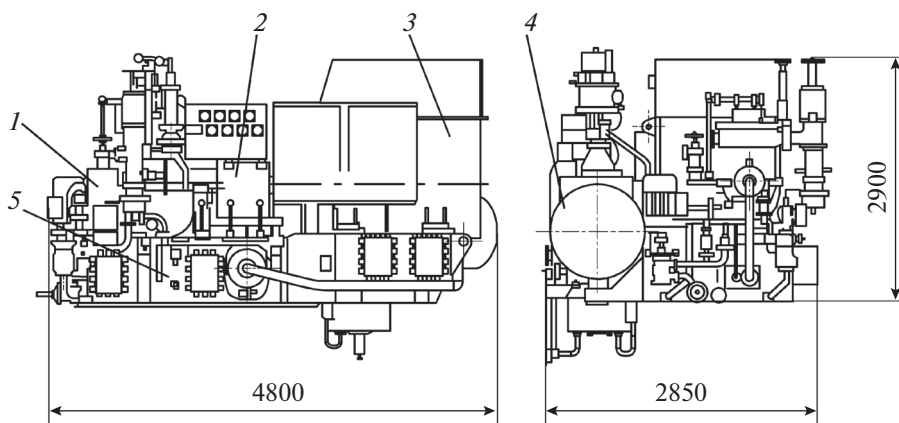


Рис. 6. Турбогенераторная установка ТГ 0.6/0.4-2.8 (мини-ТЭЦ).
1 – турбина; 2 – редуктор; 3 – генератор; 4 – бойлер; 5 – рама-маслобак

ничество на применение медьсодержащих материалов и вызывает необходимость комплектации дополнительными устройствами подготовки пара (грязеуловителями, сепараторами, шумоглушителями и др.). Труднодоступность геотермальных полей и сложность постройки на них стационарных зданий определили размещение ТГУ в контейнерах вагонного типа, оснащенных инженерными системами, необходимыми для эксплуатации и обслуживания (освещения, вентиляции, обогрева, пожаротушения). Конструкция и габариты контейнеров позволяют транспортировать их с установленным внутри оборудованием автомобильным, железнодорожным и морским транспортом, а для установок малой мощности и на вертолетной подвеске.

Первая опытная установка мощностью 500 кВт ОМЕГА-500 с выхлопом в атмосферу была установлена в 1992 г. на о. Кунашир Курильской гряды. В 1994 г. были изготовлены четыре установки “Туман-2” электрической мощностью по 1.7 МВт с двумя возможными вариантами эксплуатации – с выхлопом в атмосферу или на станцию теплоснабжения ГТС-700П тепловой мощностью 20 МВт (рис. 8). Две установки эксплуатируются на геотермальном месторождении “Горячий пляж” на о. Кунашир, две – на месторождении “Океанское” на о. Итуруп.

В 1997 г. были изготовлены и поставлены на Верхне-Мутновскую ГеоЭС (п-ов Камчатка) три турбогенераторные установки мощностью по 4 МВт контейнерно-модульного типа с воздушными конденсаторами (рис. 9). Применение воздушных конденсаторов в климатических условиях Камчатки было осуществлено впервые, и опыт их эксплуатации был полезен для НПВП “Турбоконт” в



Рис. 7. Турбогенераторная установка с противодавленческой турбиной ПР-6-3.4/1.5 в котельной ЗАО “Куйбышев-азот”, г. Тольятти

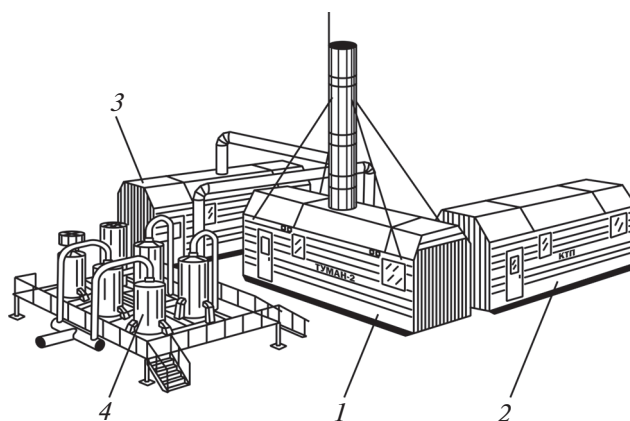


Рис. 8. Общий вид геотермальной установки “Туман-2” с ГТС-700П.
Модуль: 1 – турбогенераторный; 2 – комплектной трансформаторной подстанции; 3 – теплофикационный, 4 – подготовки пара



Рис. 9. Турбогенераторные установки с воздушными конденсаторами на Верхне-Мутновской ГеоЭС

последующем при разработке их и сухих градирен в других проектах.

“ПРИКЛЮЧЕННЫЕ” ТГУ

В последнее время появился спрос на “приключенные” ТГУ, работающие на паре из отбора или выхлопа основной турбины. Такая схема позволяет существенно увеличить выработку электрической энергии при нагружении на полную мощность эксплуатируемой турбины и выработать дополнительную электрическую энергию “приключенным” турбогенератором. Примерами использования на практике такой схемы являются Пинская ТЭЦ (Республика Беларусь) с турбогенератором ТГ 4.0/6.3 P0.6/0.1, работающим

на паре выхлопа основной турбины, и ТЭЦ-4 “Тверьэнерго” с турбогенератором ТГ 4 АСП12/1.2, работающим на паре от отбора основной турбины (рис. 10).

БИНАРНЫЕ ТГУ

Новым направлением для НПВП “Турбоконт” и ОАО КТЗ стала разработка бинарных турбогенераторных установок, работающих на низкокипящих органических теплоносителях. Опытная бинарная установка мощностью 2.5 МВт, использующая сбросное тепло отсепарированной воды температурой 120°C, установлена на Паужетской ГеоЭС (п-ов Камчатка) [3, 4]. Проект не завершен, так как неполадки, неизбежно возникающие на головных образцах, стали поводом для прекращения финансирования разработки перспективной энерготехники.

Применение бинарных турбогенераторных установок позволяет утилизировать сбросное низкопотенциальное тепло различных производств, увеличить эффективность использования геотермального теплоносителя. В настоящее время сотрудники НПВП “Турбоконт” и ОАО КТЗ разрабатывают типовой ряд таких установок.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные на Калужском турбинном заводе блочные турбогенераторные установки мощностью 0.5–8.0 МВт с теплотехническими схемами НПВП “Турбоконт” являются технологической базой для распределенной энергетики России и стран СНГ как на удаленных территориях, так и в составе



Рис. 10. Турбогенераторная установка ТГ 4 АСП12/1.2 на ТЭЦ-4 ОАО “Тверьэнерго”, г. Тверь

ве энергосистем. Участие локальных источников электроэнергии обеспечивает при когенерации ее низкую себестоимость и повышает надежность энергоснабжения.

2. В настоящее время электроэнергия, произведенная генерирующими источниками распределенной энергетики, в основном используется на покрытие собственных нужд производства. Отсутствие в России условий, стимулирующих подключение мелких производителей к общей сети, сдерживает развитие распределенной энергетики, а сетевые компании не заинтересованы в ее подключении.

3. Наибольшим спросом пользуются установки распределенной энергетики с противодавлением как более простые и дешевые. Мощность заказываемых установок в последнее десятилетие повысилась на порядок в связи с тем, что экономическая эффективность более мощных установок значительно выше, чем мелких. Кроме того, распределенной энергетикой заинтересовались крупные предприятия, имеющие более мощные котельные установки и паровые технологии.

4. В перспективе можно ожидать повышения спроса на “приключенные” генерирующие уста-

новки, компенсирующие сезонные или технологические колебания потребления тепловой энергии на ТЭЦ и ТЭС.

5. Значительные запасы в России низкопотенциальных геотермальных вод, наличие большого количества сбросного тепла производственных предприятий в перспективе определяют востребованность бинарных генерирующих установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильман О.О. Технично-экономические показатели мини-электростанций с противодавленческими турбинами // Теплоэнергетика. 2000. № 1. С. 6–8.
2. Федоров В.А., Смирнов В.М. Опыт разработки, строительства и ввода в эксплуатацию малых электростанций // Теплоэнергетика. 2000. № 1. С. 9–13.
3. Томаров Г.В. Геотермальное энергетическое оборудование и технологии в России // Энергетик. 2014. № 2. С. 21–24.
4. Оборудование геотермального энергоблока с бинарным циклом на Паужетской ГеоЭС / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семенов, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 22–28. <https://doi.org/10.1134/S0040363614060101>

Turbogenerating Units for Cogeneration and Distributed Power Plants

I. S. Serbin^a, Yu. G. Savinchenko^a, O. O. Mil'man^{b, c}, and V. M. Tolkachev^{b, *}

^aОАО Kaluga Turbine Works (KTW), Kaluga, 248010 Russia

^bZAO Scientific Production and Innovation Enterprise (NPVP) Turbokon, Kaluga, 248010 Russia

^cTsiolkovsky Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

Abstract—A description of the energy-saving technology for the generation of electrical energy is presented in the superstructure of steam boiler houses with turbine-generator units (TGU) with backpressure turbines operating in parallel with reduction cooling units. The characteristics and description of a TGU for distributed energy, developed at ОАО KTW, with backpressure turbines and condensing turbines with and without steam extraction, surface and air condensers, and mini-CHP with built-in boilers for heating network water are given. TGUs are described for geothermal energy with turbine exhaust to the atmosphere or to a heat-supply station with condensing turbines with air condensers. The technical characteristics of TGUs of various types, the number of units produced, and the place of their operation are given. The design features of TGUs manufactured at ОАО KTW are noted: block layout, 100% factory readiness, high degree of automation, and reliability during operation. Prospects for further developing the direction of turbine-generator sets for distributed energy are shown: development and delivery of condensing and backpressure turbine-generating sets with a capacity increased to 8 MW; expanding the range of a “connected-in” TGU operating on steam from the extraction or exhaust of the main turbines, which make it possible to compensate for seasonal or technological fluctuations in heat energy consumption and ensure more efficient operation of the main turbines; and development of binary plants using low-grade heat and operating on low-boiling organic heat carriers. High efficiency of distributed power generation in combination with cogeneration is noted.

Keywords: turbine, generator, distributed energy, layout, backpressure, power, binary cycle, condenser, heat supply, heat energy consumption, organic heat carriers