

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ БИНАРНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

© 2021 г. П. А. Березинец^а, *, Г. Е. Терёшина^а

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: vti-berezinets@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2020 г.

После доработки 31.10.2020 г.

Принята к публикации 18.11.2020 г.

Выполнено сравнение котлов-утилизаторов парогазовых установок. Котлы-утилизаторы газовых турбин предназначены для глубокого охлаждения газов при производстве максимального количества пара с параметрами, соответствующими рабочему процессу в паровой турбине. Для этого элементы поверхности нагрева котла-утилизатора располагаются таким образом, чтобы создавался противоток по отношению к движению выхлопных газов газовой турбины, а теплопередача в них осуществлялась при минимальных температурных напорах. Теплообменные элементы могут размещаться как в вертикальном, так и в горизонтальном газоходе. Соответственно, они выполняются из змеевиков с горизонтальными трубами с входным и выходным коллекторами или из панелей с вертикальными трубами, каждая из которых имеет нижний и верхний коллекторы. Панели в элементе соединяются перепускными трубами, чтобы организовать противоточное движение нагреваемой среды (вода, пар) и газов после газовой турбины. Это означает, что каждый гиб змеевика вертикального котла в горизонтальном котле заменяется двумя коллекторами, соединенными перепускными трубами. Вертикальное расположение теплообменных труб в горизонтальном газоходе требует организации дренажного каждой панели в виде разветвленной дренажной системы с отключающей арматурой и расширителем дренажей, установленным ниже нулевой отметки. Теплообменные элементы, выполненные из горизонтальных труб в виде змеевиков и расположенные в вертикальном газоходе, дренируются только через два коллектора, а расширитель дренажей устанавливается на нулевой отметке. В испарительных элементах вертикального котла-утилизатора реализуется прямая схема движения теплоносителей, при которой обеспечивается равномерное распределение расходов пара, генерируемого в испарительных змеевиках, в испарительных элементах горизонтального котла-утилизатора – перекрестная схема движения теплоносителей, которая формирует неравномерное распределение расходов пара, генерируемого в испарительных панелях. Дополнительное преимущество вертикальному котлу-утилизатору дает использование самотяги, которая увеличивает мощность газовой турбины. Несмотря на очевидные теплотехнические преимущества вертикальных котлов-утилизаторов, в настоящее время в России строятся преимущественно горизонтальные, хотя в мире наблюдается конкуренция между вертикальными и горизонтальными котлами-утилизаторами, в которой главную роль играет мнение заказчика.

Ключевые слова: парогазовые установки, газотурбинные установки, котлы-утилизаторы вертикальные и горизонтальные, испарительные панели и змеевики, противоточное и прямоточное движение теплоносителей, дренажная система

DOI: 10.1134/S0040363621060023

Котлы-утилизаторы термодинамически связывают газотурбинный и паровой циклы парогазовых установок (ПГУ). В них тепло отработавших в газотурбинной установке (ГТУ) газов используется для генерации пара, производящего затем работу в паровой турбине. Для достижения высокой мощности паровой турбины котел-утилизатор должен генерировать максимально возможное количество пара с наибольшими сопряженными параметрами.

Невысокая температура выхлопных газов ГТУ (500–650°C) определяет в утилизирующих их тепло поверхностях нагрева конвективный теплообмен при небольших температурных напорах и не-

высокое отношение паропроизводительности к расходу газов. Количество утилизируемого тепла в одном парогенерирующем контуре котла-утилизатора Q и глубина охлаждения отработавших в ГТУ газов $\Delta T = T_{10} - T_{13}$ (рис. 1, а) зависят от критического температурного напора на “холодном” конце испарителя $\Delta t_{кр}$, недогрева воды до кипения $\Delta t_{ндгр}$ в экономайзере и температурного напора на “горячем” конце пароперегревателя $\Delta t_{пе}$, определяющих температуру газов перед испарителем T_{11} . По степени влияния на Q и ΔT эти параметры располагаются в следующей последовательности:

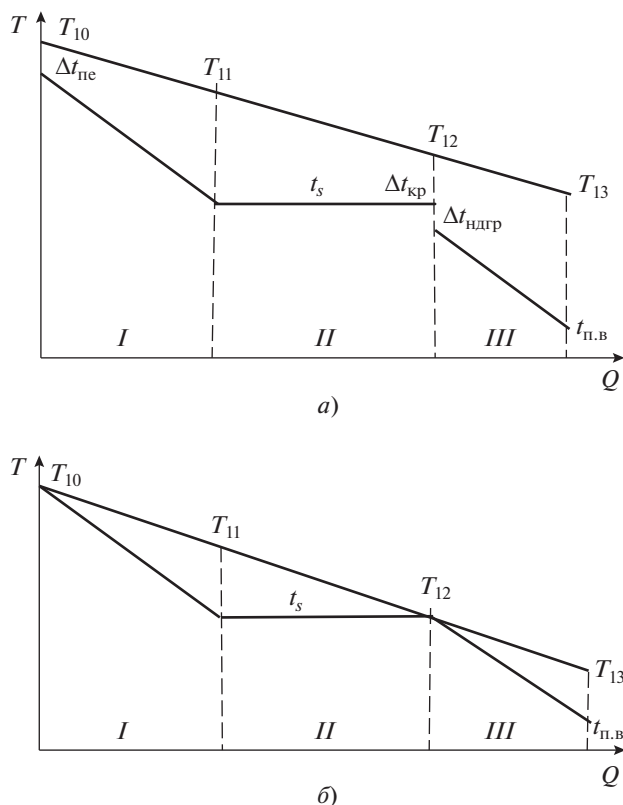


Рис. 1. Q, T -диаграмма теплообмена в одноконтурном котле-утилизаторе для реального процесса при конечной (а) и бесконечной (б) площади поверхности нагрева.
 I – перегревательный участок; II – испарительный участок; III – экономайзерный участок

$\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{ндгр}$, $\Delta t_{пе}$. Необходимо отметить, что температура питательной воды $t_{п.в.}$ оказывает очень слабое влияние на температуру уходящих газов T_{13} и не влияет на паропроизводительность, зависящую от количества утилизируемого тепла на перегревательном и испарительном участках парогенерирующего контура (I и II на рис. 1). Паропроизводительность зависит от температуры насыщения пара t_s , критического температурного напора $\Delta t_{кр}$,

недогрева воды до кипения в экономайзере $\Delta t_{ндгр}$ и температурного напора на “горячем” конце пароперегревателя $\Delta t_{пе}$.

Необходимо отметить, что при $\Delta t_{кр} = \Delta t_{ндгр} = \Delta t_{пе} = 0$ (а это возможно только при бесконечно большой площади поверхности нагрева парогенерирующего контура котла-утилизатора) количество утилизируемого тепла отработавших в ГТУ газов Q и температура уходящих газов T_{13} имеют конечные значения, хотя количество передаваемого тепла на перегревательном, испарительном и экономайзерном участках увеличивается (см. рис. 1, б).

Реальное распределение температур (см. рис. 1, а) и практически недостижимое (см. рис. 1, б) всегда требуют решения задачи для оптимизации площади поверхности нагрева котла-утилизатора.

Зависимость отношения паропроизводительности к расходу газов от температуры газов перед испарителем T_{11} и давления (температуры t_s) генерируемого насыщенного пара представлена в табл. 1.

Достижение максимальной удельной паропроизводительности при малых температурных напорах возможно только при высокой теплопередающей способности поверхности нагрева, т.е. при больших значениях произведения коэффициента теплопередачи на площадь поверхности теплообмена. Поскольку коэффициент теплоотдачи с газовой стороны на два порядка меньше коэффициента теплоотдачи к обогреваемой среде внутри труб, то повысить теплопередающую способность можно только увеличением площади наружной поверхности, т.е. посредством внешнего оребрения теплообменных труб.

При повышении давления пара увеличивается температура газов за парогенерирующим контуром и на выходе из котла-утилизатора. Уменьшение ее возможно путем доохлаждения газов в дополнительных парогенерирующих контурах с более низкими давлениями и температурами, которые обусловлены рабочим процессом в паровой турбине. Это обеспечивает снижение температуры уходящих газов и повышение мощности паровой турбины.

Таблица 1. Удельная паропроизводительность котла, кг/кг, при критическом напоре 10°C и недогреве воды до кипения 5°C

Температура газов перед испарителем T_{11} , $^\circ\text{C}$	Давление насыщенного пара, МПа						
	3	4	6	8	10	12	14
300	0.033	0.025	0.010	–	–	–	–
350	0.062	0.057	0.044	0.034	0.023	0.013	0.002
400	0.094	0.088	0.079	0.071	0.064	0.059	0.052
450	0.124	0.120	0.113	0.110	0.108	0.105	0.105
500	0.155	0.152	0.150	0.148	0.149	0.150	0.155

Таблица 2. Параметры пара за котлами-утилизаторами ПГУ

Контур	Параметр	Число контуров КУ			
		барабанного			прямоточного
		1	2	3	3
ВД	Давление, МПа	5–8	5–8	11–14	14–18
	Температура, °С	490–540	490–540	540–600	560–600
СД + ПП	Давление, МПа	–	–	2.0–3.5	2.0–3.5
	Температура, °С	–	–	540–610	560–610
НД	Давление, МПа	–	0.5–0.7	0.4–0.6	0.4–0.6
	Температура, °С	–	200–230	210–250	210–250

ны. При увеличении числа контуров котла-утилизатора КПД парового контура паросиловой части ПГУ возрастает:

Число контуров	1	2	3	4
КПД, %	26.75	29.40	29.90	30.20

Промежуточный перегрев пара (ПП) увеличивает мощность и экономичность парового контура ПГУ.

Параметры пара за современными котлами-утилизаторами указаны в табл. 2.

БАРАБАНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

Котлы-утилизаторы после мощных ГТУ поколений F и H с температурой выхлопных газов 570–680°С выполняются с тремя контурами генерации пара и промежуточным перегревом пара, где газы могут двигаться в вертикальном или горизонтальном направлении.

В вертикальном котле-утилизаторе змеевиковые трубы поверхностей нагрева расположены горизонтально в вертикальной плоскости. Газы

движутся снизу вверх, однофазные среды – вода и пар – сверху вниз. В испарителях осуществляется прямоточное движение газов и кипящей воды. Такая конструкция обеспечивает компенсацию тепловых расширений труб по длине и в вертикальной плоскости змеевиков, минимизируя тем самым термические напряжения в местах их приварки к коллекторам. Для предупреждения термических напряжений при продольном расширении труб змеевики крепятся в трубных досках (рис. 2) без фиксации. Крутоизогнутые калачи (радиусгиба менее двух диаметров трубы по ребрам) позволяют создавать предельно компактную шахматную компоновку пучков труб.

Модули поверхностей нагрева подвешиваются в газоходе котла-утилизатора к хребтовым балкам каркаса. Трубные доски модулей соединяются с помощью серег в ремонтном пространстве между ними.

Прямоточное движение кипящей воды и газов в испарителях обеспечивает одинаковую тепловую нагрузку рядов труб по ходу движения газов и примерно одинаковые расходы пара, генерируемые параллельными змеевиками. Это сводит к минимуму термические напряжения в собираю-

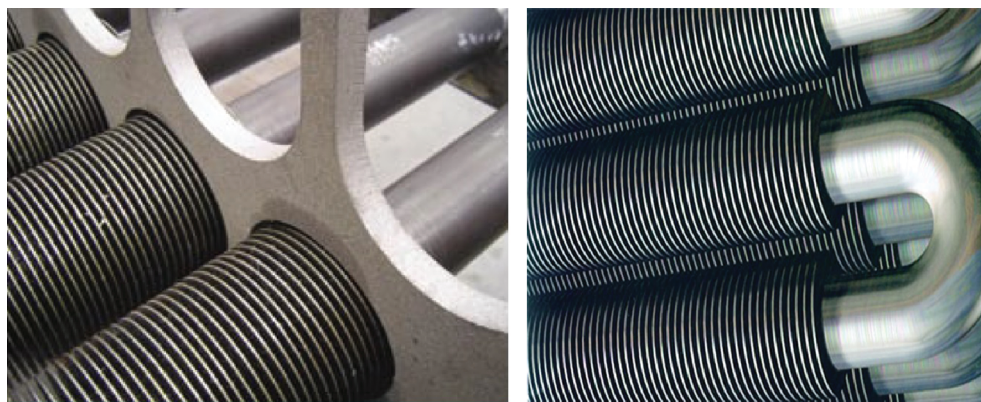


Рис. 2. Крепление горизонтальных змеевиков оребренных труб в трубных досках

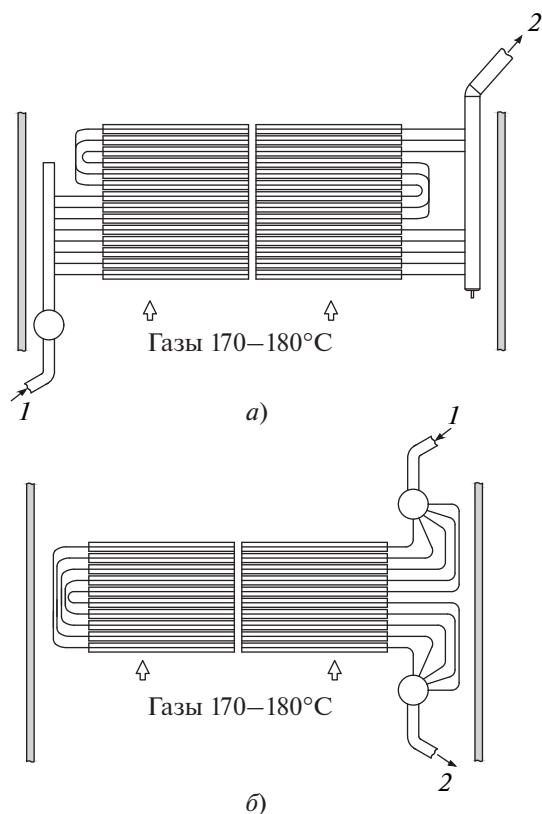


Рис. 3. Прямоточный (а) и противоточный (б) испаритель вертикального котла-утилизатора с естественной циркуляцией.
1 — вход воды; 2 — выход пароводяной смеси

шем коллекторе и возможные повреждения в местах приварки.

Дренирование поверхностей нагрева осуществляется из их нижних коллекторов в нескольких точках по длине. Поскольку самая нижняя поверхность нагрева (пароперегреватель) — первая по ходу газов — расположена после поворота из горизонтального диффузора, соединяющего ГТУ и котел-утилизатор, ее нижний коллектор находится на довольно большой высоте, позволяющей установить расширитель дренажей и бак слива из него на нулевой отметке и обеспечить в него свободный (гравитационный) слив воды. Это значительно упрощает компоновку и эксплуатацию внутриблочных вспомогательных систем.

Анализ опыта эксплуатации ПГУ с вертикальными котлами-утилизаторами показывает, что высокая эксплуатационная готовность и надежность — это их неотъемлемые характеристики [1].

Исторически вертикальные котлы-утилизаторы поставлялись с принудительной циркуляцией. Однако в их испарителях возможно применение и естественной циркуляции со скоростями, которые не допускают расслоения пароводяного по-

тока, возникновения пульсаций, а также отложений шлама в горизонтальных трубах.

Для обеспечения максимального полезного напора гидравлическое сопротивление опускных и отводящих труб циркуляционного контура должно быть минимальным, внутреннее суммарное сечение парогенерирующих труб (многозаходные однопетлевые змеевики) максимальным, а высота расположения паровых барабанов достаточной для создания необходимого движущего напора (разности нивелирных напоров в опускной и подъемной ветвях циркуляционного контура) [2–4]. Испаритель при этом может быть как прямоточным, так и противоточным [5] (рис. 3).

Преимущество противоточного испарителя состоит в том, что при пуске котла-утилизатора парообразование начинается на горячей стороне испарителя (в нижних трубах) и пар может сразу поступать в подъемные трубы, что сокращает продолжительность пуска.

В прямоточном испарителе обеспечивается защита труб при пуске. Это его главное достоинство для применения в котлах-утилизаторах с частыми пусками и остановами.

Пионер применения естественной циркуляции в вертикальных котлах-утилизаторах — австрийская компания AE&E (Austrian Energy&Environment), которая в середине 80-х годов прошлого века разработала технические решения без применения пусковых насосов или эжекторов и в 1987 г. реализовала одно из них на электростанции Leopoldau (Австрия), а в 2002 г. — на электростанции Brighton Beach (Онтарио, Канада) [5].

В России вертикальный котел-утилизатор с естественной циркуляцией был изготовлен ОАО «ЭМАльянс» (ОАО ТКЗ) и введен в эксплуатацию в 2011 г. на Краснодарской ТЭЦ в составе трехконтурного парогазового энергоблока с промежуточным перегревом пара. Базовый инжиниринг был выполнен чешским филиалом компании AE&E, а рабочая и технологическая документация — ОАО ТКЗ.

Тепловая схема котла-утилизатора представлена на рис. 4. В газовом тракте противотоком к движению газов расположены 15 элементов трех контуров котла, кроме испарителей, в которых осуществляется прямоточное (восходящее) движение теплоносителей. Такая организация теплопередачи обеспечивает глубокое охлаждение газов от 600 до 90°C при температуре наружного воздуха 15°C и номинальной мощности ПГУ, составляющей в конденсационном режиме 450 МВт (здесь 303.4 МВт — мощность ГТУ), коэффициент полезного действия ПГУ брутто равен 57.8%, КПД ГТУ — 39%.

Все элементы дренируются из нижних коллекторов, верхние коллекторы оснащены воздушными штуцерами (воздушниками), кроме испарите-

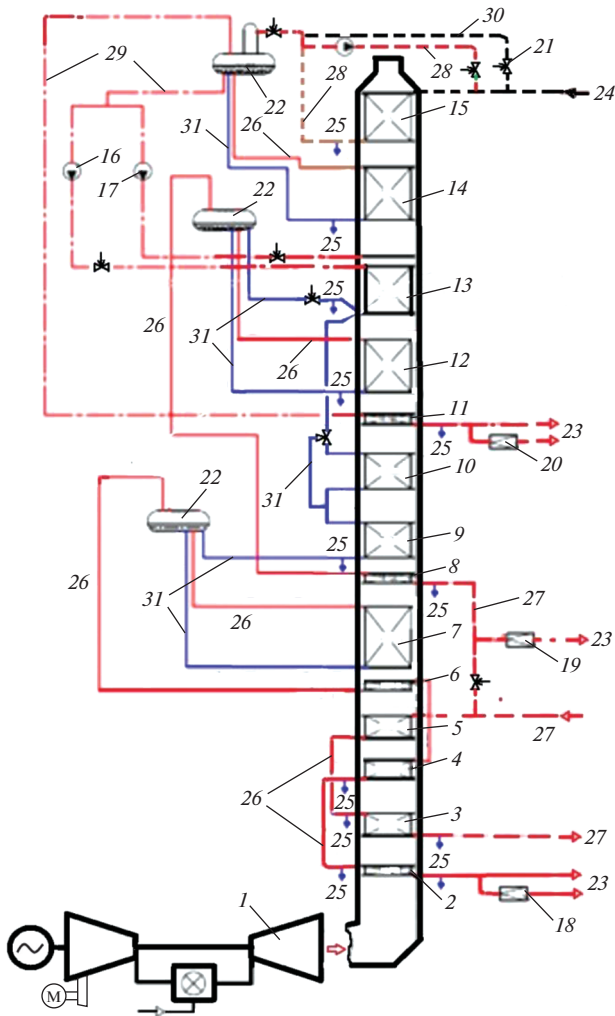


Рис. 4. Котел-утилизатор ЭМА-003-4 (Еп-307/353/41,5-12,6/3,1/0,5-565/560/250) для ПГУ-410 (1×701F4).

1 – газотурбинная установка; 2 – пароперегреватель высокого давления, третья ступень; 3 – промежуточный пароперегреватель, вторая ступень; 4 – пароперегреватель высокого давления, вторая ступень; 5 – промежуточный пароперегреватель, первая ступень; 6 – пароперегреватель высокого давления, первая ступень; 7 – испаритель высокого давления; 8 – пароперегреватель среднего давления; 9 – водяной экономайзер высокого давления, третья ступень; 10 – водяной экономайзер среднего давления, вторая ступень; 11 – пароперегреватель низкого давления; 12 – испаритель среднего давления; 13 – водяной экономайзер высокого давления, первая ступень, и водяной экономайзер среднего давления; 14 – испаритель низкого давления; 15 – газовый подогреватель конденсата; 16 – питательный насос высокого давления; 17 – питательный насос среднего давления; 18 – быстродействующая редукционно-охлаждательная установка (БРОУ) высокого давления; 19 – БРОУ среднего давления; 20 – быстродействующая редукционная установка (БРУ) низкого давления; 21 – регулирующий клапан; 22 – паровой барабан; 23 – выход пара; 24 – вход конденсата; 25 – дренаж (удаление конденсата); 26 – пар; 27 – вторичный пар; 28 – нагретый конденсат; 29 – питательная вода; 30 – холодный конденсат; 31 – вода парогенерирующих контуров; М – привод входного направляющего аппарата

лей, верхние коллекторы которых соединены с паровыми барабанами.

Для стимулирования циркуляции при пусках ГТУ в подъемные трубы испарителей высокого и среднего давления (ВД и СД) пар подается от внешнего источника, в испаритель низкого давления (НД) – через нижний коллектор, так как верхний находится близко к барабану низкого давления.

Барабан низкого давления оснащен деаэрационной колонкой для поддержания концентрации кислорода ниже 10 мкг/дм^3 во всех трех контурах, кроме газового подогревателя конденсата, из которого конденсат поступает в деаэрационную колонку.

В период освоения энергоблока возникали нарушения циркуляции в паропроводящих трубах контура среднего давления и их вибрация. Причинами этого послужили многозначная гидравлическая характеристика развернутой паропроводящей трубы и высокая массовая скорость пароводяной смеси в ней [6]. В пусковых режимах нарушения не отмечались. Следует обратить внимание на то, что на энергоблоке применена однобайпасная пусковая схема (18–20).

ПРЯМОТОЧНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

При давлении пара более 14 МПа возможны отказ от барабана высокого давления и осуществление в контуре прямоточной генерации пара. Однако при нисходящем движении среды возникает проблема генерации пара в поверхности нагрева из-за многозначности гидравлической характеристики испарительной части. Решить эту проблему возможно, во-первых, уменьшением тепловосприятия первых по ходу воды (последних по ходу газов) рядов труб экономайзерного участка посредством использования там гладких труб без оребрения, во-вторых, применением ступенчатого витка, т.е. выполнением входной части змеевика из труб с меньшим, чем в выходной части, внутренним диаметром (распределенное дросселирование), и, в-третьих, устройством вертикальной петли перед входом в испаритель.

Устранение многозначности гидравлической характеристики испарителя возможно также с помощью разработанной в ВТИ схемы [7]. Для повышения гидравлической устойчивости испарителя трубы экономайзерного участка перед испарительно-перегревательной частью выполняют петлю с нисходящим участком в необогреваемой и восходящим участком в обогреваемой зоне. Опускной и подъемный участки разделяют промежуточными смесительными коллекторами.

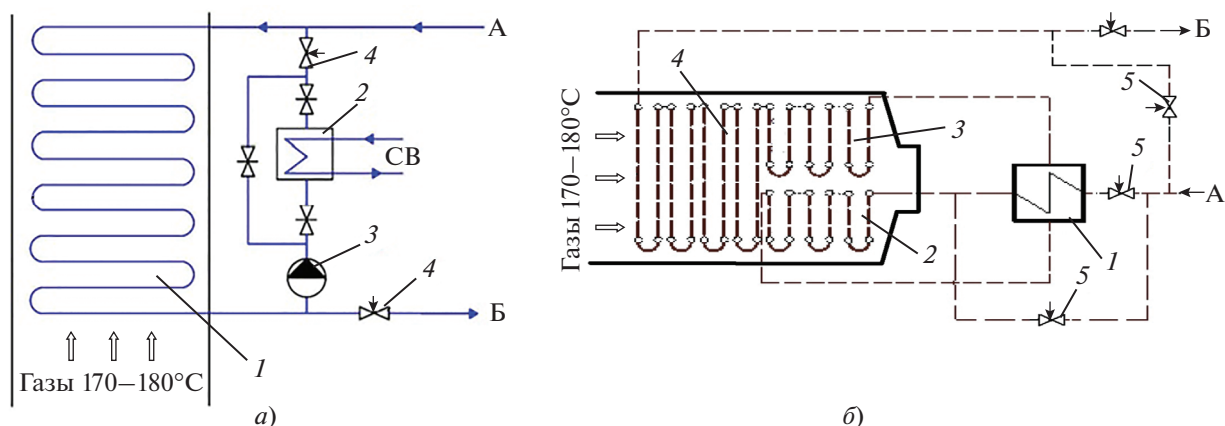


Рис. 5. Газовые подогреватели конденсата котлов-утилизаторов.

а – схема ВТИ: 1 – газовый подогреватель конденсата (ГПК); 2 – водо-водяной теплообменник (ВВТО); 3 – рециркуляционный насос; 4 – регулирующий клапан.

б – схема Nooter&Eriksen: 1 – ВВТО; 2 – ГПК, первая ступень; 3 – ГПК, вторая ступень; 4 – ГПК, третья ступень; 5 – регулирующий клапан.

А – вход конденсата из турбоустановки; Б – выход нагретого конденсата; СВ – сетевая вода

ГАЗОВЫЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЬ КОНДЕНСАТА

Наличие газового подогревателя конденсата (ГПК) – последней по ходу газов поверхности нагрева, в котором нагревается весь конденсат, поступающий из турбоустановки, – это особенность котлов-утилизаторов, которая состоит в том, что конденсат после ГПК должен поступать в деаэрационную колонку недогретым до насыщения, а в теплофикационных ПГУ температура перед ним может изменяться от 40 до 90°C. Из-за этого возникают две проблемы: первая – для исключения конденсации водяных паров на теплообменных трубах из уходящих газов температура конденсата должна быть выше 60°C; вторая – необходимо исключить кипение конденсата при его высокой температуре на входе, а также при снижении нагрузки ПГУ. Полностью обе эти проблемы решаются при реализации схемы, представленной на рис. 5, *а*. Температура конденсата на входе в ГПК и за ним поддерживается рециркуляцией нагретого конденсата. Но поскольку для снижения температуры конденсата за ГПК требуется увеличение его расхода на рециркуляцию, то при этом возрастают температура конденсата перед ГПК и температура уходящих газов. Для исключения этой потери тепла рециркулирующий расход конденсата охлаждается в водо-водяном теплообменнике, нагревая сетевую воду или воду, поступающую на водоподготовку. Как правило, все котлы-утилизаторы ПГУ-ТЭЦ оснащаются такими системами.

Альтернативное решение, при котором рециркуляционные насосы исключаются, представлено на схеме, разработанной Nooter&Eriksen (см. рис. 5, *б*). Хотя здесь и отсутствуют рециркуляционные насосы, но по затратам мощности на про-

качку конденсата она не выигрывает по сравнению с предыдущей, так как увеличивается гидравлическое сопротивление системы ГПК–ВВТО и эта нагрузка ложится на конденсатные насосы. Такая схема не решает вторую проблему, поэтому она используется только в конденсационных ПГУ, оснащенных лицензионными котлами-утилизаторами компании Nooter&Eriksen, изготавливаемыми ОАО ТКЗ.

БАРАБАННЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

В горизонтальном котле-утилизаторе (рис. 6) генерация пара осуществляется в обогреваемых вертикальных трубах при естественной циркуляции среды, как это происходит в барабанных энергетических котлах.

Высота газохода в горизонтальном котле примерно в 2.5 раза больше ширины и более чем в 3 раза превышает диаметр выхлопного диффузора ГТУ, из которого в газоход поступают отработавшие в ГТУ газы. Для сокращения длины он выполняется с большим односторонним раскрытием. Это создает скоростную неравномерность газового потока и его расслоение по высоте, которые снижают тепловосприятие поверхностей нагрева котла-утилизатора.

Горизонтальное движение газов исключает использование самотяги газохода, что, естественно, увеличивает противодавление на выхлопе ГТУ и снижает ее мощность.

Все поверхности нагрева горизонтального котла-утилизатора набираются в блоки (модули) из практически одинаковых элементов – двурядных вертикальных ширм, образованных верхним и

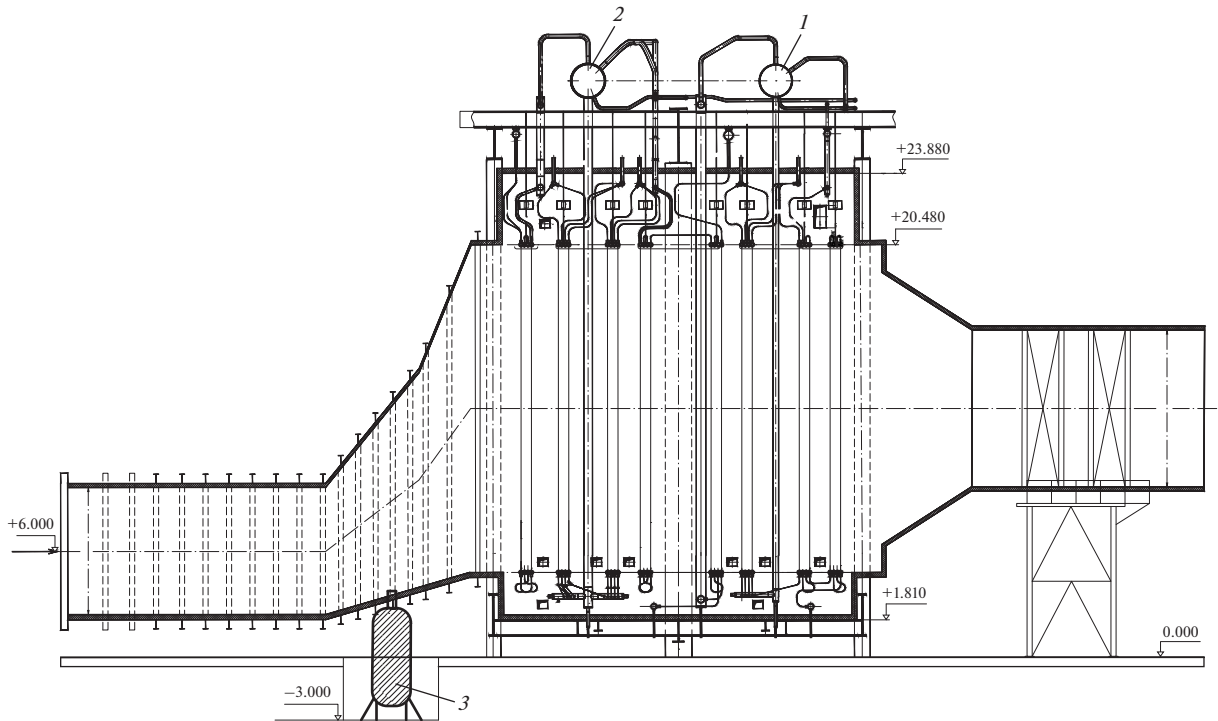


Рис. 6. Котел-утилизатор П-96 ПГУ-450Т (2×SGT5-2000Е).
1 – барабан низкого давления; 2 – барабан высокого давления; 3 – расширитель пара

нижним коллекторами, в которые в шахматном порядке вварены оребренные трубы. Блоки доставляются на строительную площадку в готовом виде и подвешиваются к хребтовым балкам внутри газохода котла-утилизатора.

Такая конструкция вертикальных ширм довольно жесткая, и поэтому при неодинаковом тепловом расширении труб (при теплогидравлической разверке) в коллекторах могут возникать значительные термические напряжения.

На рис. 7 показана конструкция ширм и блоков котла-утилизатора ПГУ-450Т (2×SGT5-2000Е) Калининградской ТЭЦ-2. Для уменьшения термических напряжений в коллекторах каждая труба вваривается в один из коллекторов (верхний или нижний) радиально. Однако уголгиба небольшой, так как от него зависит продольный шаг труб в пучке. Для организации движения среды в трубах экономайзера или пароперегревателя коллекторы связаны перекидными трубами и образуют вертикальный змеевик.

В испарителях все ширмы по среде включаются параллельно. Поскольку там реализуется однократный перекрест, температурный напор на первых по ходу газов рядах труб намного (в 10–20 раз) выше, чем на последних рядах труб, где паропроизводительность и кратность циркуляции значительно ниже, чем в первых рядах. В последних рядах труб возможны застой и опрокидывание циркуляции, а также отложение шлама. Чтобы исключить

это, необходимо увеличить расход воды на входе в первые ряды теплообменных труб и снизить его на входе в последние ряды. Для этого в трубах, подводящих воду к нижним коллекторам рядов теплообменных труб, устанавливают дроссельные шайбы.

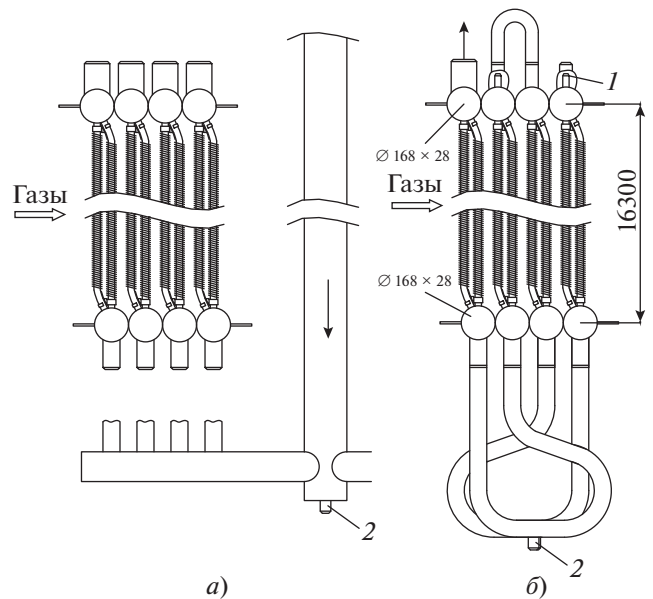


Рис. 7. Пакеты испарителя (а) и экономайзера (б) высокого давления котла-утилизатора П-96 (изготовитель ЗиО-Подольск).
1 – воздушный штуцер; 2 – дренажный штуцер

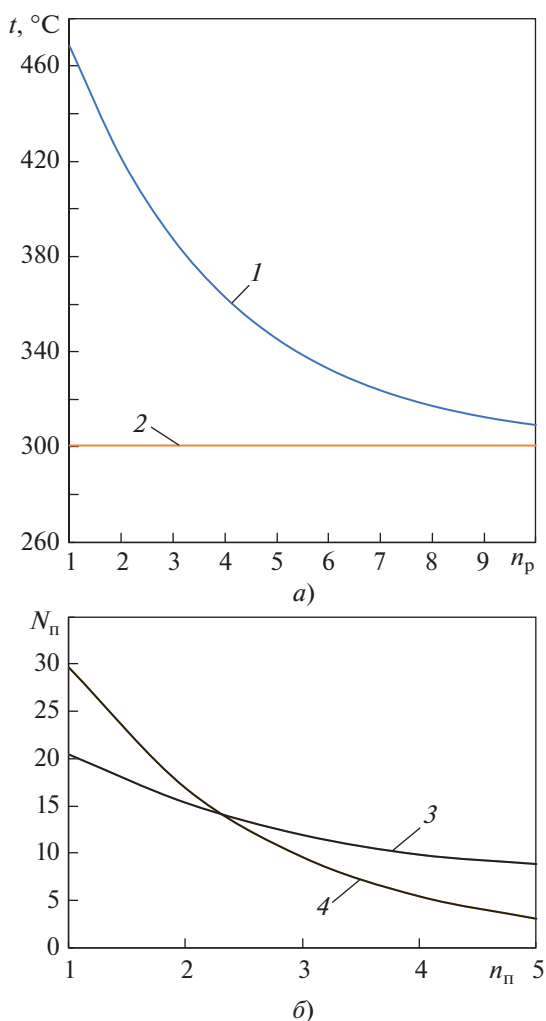


Рис. 8. Распределение температур газов t (а) и паропроизводительности N_n (б) в трубах по ходу газов испарителей вертикального и горизонтального котлов-утилизаторов.

n_p – номер ряда труб; n_n – номер петли, ширмы, $n_n = n_p/2$.

1 – температура газов на входе в ряды труб испарителя ВД; 2 – температура кипящей воды; 3 – паропроизводительность однопетлевого испарителя ВД вертикального котла-утилизатора; 4 – паропроизводительность двутрубных ширм испарителя ВД горизонтального котла-утилизатора

При проведении водно-химических промывок (после монтажа и капремонта) шайбы временно вырезают.

На рис. 8 для сравнения представлены характеристики испарителей вертикального и горизонтального котлов-утилизаторов ПГУ-450Т. Распределение температур газов по ходу движения в испарителях вертикального и горизонтального котлов-утилизаторов одинаково (рис. 8, а), но генерация пара (рис. 8, б) существенно различается: в испарителе вертикального котла-утилизатора

паропроизводительность петель змеевиков различается в 2 раза (в первой петле больше), в испарителе горизонтального – почти в 10 раз. Из рис. 8, б следует, что паровая нагрузка первого ряда ширм испарителя горизонтального котла-утилизатора в 1.5 раза выше, чем первой петли испарителя вертикального котла-утилизатора.

Скоростная и температурная неравномерность газового потока по высоте газохода, неплотный шахматный пучок, однократный перекрест в испарителе снижают коэффициенты теплопередачи и, соответственно, требуют увеличения площади поверхности нагрева и аэродинамического сопротивления [8].

Существенный недостаток горизонтальных котлов-утилизаторов заключается в разветвленной дренажной системе поверхностей нагрева с большим количеством отключающей арматуры. В их экономайзерных и пароперегревательных поверхностях осуществляется подъемно-опускное движение нагреваемой среды. Поэтому для заполнения и опорожнения верхние коллекторы каждой экономайзерной ширмы должны оснащаться линиями для удаления (впуска) воздуха, а нижние коллекторы – дренажными линиями с отключающей арматурой. На рис. 7, б показаны штуцеры для подключения этих линий. В другой распространенной конструкции для удаления воздуха при заполнении экономайзерных поверхностей требуется прокачка воды через трубы со скоростью более 0.4 м/с. При этом расход воды может составлять более 50% номинального значения.

Коллекторы, перепускные трубы между ними и дренажные линии с отключающей арматурой занимают много места по высоте. В результате для свободного (гравитационного) слива дренажей расширитель, бак слива из него и насосы откачки располагаются на отметке –3.0 м (см. рис. 6).

Ремонты горизонтальных котлов связаны с определенными трудностями [9]. При повреждении теплообменных трубок нелегко определить место образования свища или разрыва трубки. Высота теплообменных пакетов (длина трубок) составляет 20 м и более, по ходу газов в пакете располагаются 14–16 рядов трубок. Визуальному осмотру доступны только 2–3 ряда на входе в пакет и выходе из него, причем только на высоте до 2.5 м от низа газохода. Для осмотра на остальной высоте требуется установка строительных лесов. Трубки внутри пакета для визуального осмотра недоступны. Для определения места повреждения необходима специальная аппаратура (эндоскопы, ультразвуковые приборы и др.).

Если повреждение произошло на расстоянии до 0.5 м от коллектора, то замену поврежденного участка можно произвести в “теплых ящиках”, опустив или подняв ширму из газохода и предварительно отрезав ее от перепускных труб. Если

повреждение трубки произошло в середине газохода и внутри пакета, то для доступа к поврежденному участку потребуются вырезка части неповрежденных трубок с последующим их восстановлением в стесненных условиях. В [9] показано, что для ремонта трубки в третьем ряду необходимо вырезать неповрежденные трубки и потом восстановить их, сварив 96 стыков.

ПРЯМОТОЧНЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ КОТЛЫ-УТИЛИЗАТОРЫ

Компания Siemens разработала, запатентовала и поставляет горизонтальные котлы-утилизаторы с прямоточным контуром высокого давления Бенсона, схема которого представлена на рис. 9.

Прямоточный испаритель котла-утилизатора разделен на две ступени, в которых сохранено, как и в барабанном котле, восходящее движение кипящей воды. Вода из водяного экономайзера поступает в нижние коллекторы ширм первой ступени, а после них с небольшим паросодержанием направляется в нисходящий смеситель, из нижней части которого раздается в ширмы второй ступени, после чего слегка перегретый пар направляется в пароперегреватель через полнопроходный сепаратор, выполняющий функцию разделения воды/пара во время пуска и останова.

Контуров среднего и низкого давления остаются в традиционной конструкции барабанного котла-утилизатора.

Прямоточный котел-утилизатор сохраняет все положительные черты, присущие традиционным барабанным котлам-утилизаторам, обеспечивая при этом более высокую маневренность благодаря отсутствию парового барабана высокого давления. Однако компания NEM (Нидерланды), производящая как вертикальные, так и горизонтальные барабанные котлы-утилизаторы, разработала технологию эксплуатации своих горизонтальных котлов, не уступающих по маневренности прямоточным котлам Бенсона компании Siemens.

Несмотря на очевидные теплотехнические преимущества вертикальных котлов-утилизаторов, в последние годы в России сооружаются преимущественно горизонтальные котлы-утилизаторы. Решающую роль в этом играет заказчик, который в первую очередь руководствуется уровнем технологии изготовления и строительства котла-утилизатора.

В настоящее время в мировой практике не существует однозначного ответа на вопрос о преимуществах прямоточного или барабанного, вертикального или горизонтального котла-утилизатора. Это хорошо иллюстрирует следующий факт. Компания Siemens в 2015–2018 гг. реализовала в Египте “под ключ” мегапроект: построила три электростанции, на каждой из которых установила

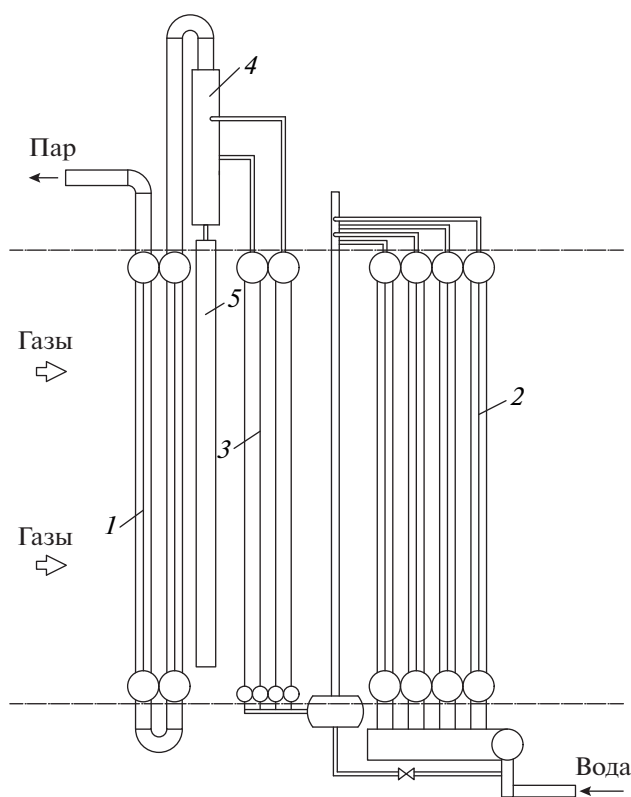


Рис. 9. Горизонтальный прямоточный котел-утилизатор Бенсона компании Siemens.

1 – пароперегреватель; 2 – испаритель высокого давления, первая ступень; 3 – испаритель высокого давления, вторая ступень; 4 – сепаратор; 5 – сборник сепарата

по четыре дубль-блока мощностью по 1200 МВт с КПД 61%. Общая мощность электростанций, включающих в себя 24 ГТУ типа SGT5-8000H, составляет 14.4 ГВт. Несмотря на то что компания Siemens уже поставила более 100 прямоточных котлов-утилизаторов Бенсона, в данном проекте за ГТУ установлены вертикальные трехконтурные котлы-утилизаторы с естественной циркуляцией и промежуточным перегревом пара, изготовленные в Южной Корее.

ВЫВОДЫ

1. Глубокая утилизация тепла отработавших в ГТУ газов (до температуры уходящих газов 80–90°C) в современных многоконтурных котлах-утилизаторах достигается при выработке пара максимальных параметров и его промежуточном перегреве, что обеспечивает наивысшую мощность паровой турбины и ПГУ.

2. Несмотря на существующую научно-техническую, технологическую и коммерческую конкуренцию, главную роль при выборе типа котла-

утилизатора для парогазовой установки играет ее заказчик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vertical HRSGs score on flexibility and reliability in later life** / Ed. by Eric Jeffs // *Turbomachinery International*. May–June 2003.
2. **Росляков П.В., Плешанов К.А., Стерхов К.В.** Исследование естественной циркуляции в испарителе котла-утилизатора с горизонтальными трубами // *Теплоэнергетика*. 2014. № 7. С. 3–10. <https://doi.org/10.1134/S0040363614070091>
3. **Стерхов К.В.** Исследование естественной циркуляции в вертикальном котле-утилизаторе: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2017.
4. **Росляков П.В., Плешанов К.А., Стерхов К.В.** Исследование работы циркуляционного контура с горизонтальным расположением труб испарителя на примере котла-утилизатора ПК-79 Челябинской ТЭЦ-1 // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы эксплуатации котлов-утилизаторов парогазовых установок”. Москва, ОАО ВТИ, 26–27 апреля 2018 г. vti.ru > filemanager/download/1722
5. **Vertical natural circulation HRSGs for Brighton Beach power station**. Artikel_brighton_beach_ve.doc. 03.09.03.
6. **Анализ** нарушения работы испарительного контура котла-утилизатора ПГУ мощностью 410 МВт / И.И. Беляков, В.И. Бреус, А.Б. Баранников, Л.А. Литвинова, М.С. Попов // *Энергетик*. 2015. № 5. С. 54–57.
7. **Пат. RU 89666 U1.** Прямоточный котел-утилизатор для парогазовой установки / Ю.П. Курочкин, А.Л. Шварц, Е.В. Сомова, Н.С. Галецкий, О.Б. Отт. Патентообладатель ОАО ВТИ. Оpubл. 10.12.2009 // Б.И. 2009. № 34.
8. **Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Жамлиханов Т.А.** Сравнительный анализ котлов-утилизаторов вертикального и горизонтального типа // *Вестник ИГЭУ*. 2009. № 4. С. 15–17.
9. **Варварский А.В.** Опыт эксплуатации котла-утилизатора Нижневартовской ГРЭС // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы эксплуатации котлов-утилизаторов парогазовых установок”. Москва, ОАО ВТИ, 26–27 апреля 2018 г. vti.ru > filemanager/download/1722

Heat Recovery Steam Generators of Binary Combined-Cycle Units

P. A. Berezinets^{a,*} and G. E. Tereshina^a

^aAll-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

*e-mail: vti-berezinets@mail.ru

Abstract—Heat recovery steam generators (HRSGs) are compared. HRSGs of gas turbines are designed for deep cooling of the exhaust gases while maximizing generation of steam at conditions corresponding to the working process of the steam turbine. To achieve this goal, the elements of the HRSG heating surface of the waste heat boiler are arranged so that the heated fluid (steam or water) is in the counterflow with exhaust gases from the gas turbine and heat transfer occurs in them at minimum temperature differences. Heat-exchange elements can be installed in both vertical and horizontal gas ducts. Accordingly, they are made from coils with horizontal pipes and inlet and outlet headers or from panels with vertical tubes, each with lower and upper headers. Panels in an element are connected with cross-over pipes to arrange a counterflow of the heated fluid (water or steam) and the gas turbine exhaust gases. This means that each bend of the coil of a vertical boiler is replaced with two headers connected with cross-over pipes in a horizontal boiler. The vertical arrangement of heat-transfer tubes in a horizontal gas requires the tubes of each panel to be properly drained using a branched drain system with shut-off valves and drain expansion tanks installed below the grade (el. 0). Heat-exchange elements made of horizontal tubes in the form of coils and located in a vertical gas duct are drained only through two headers, and the drainage expansion tank is installed at the grade (el. 0). The evaporating elements of a vertical HRSG are units with a parallel-flow pattern offering a uniform distribution of the steam generated in the evaporating coils, while the evaporative elements of a horizontal HRSG are cross-flow units featuring nonuniform distribution of the steam generated in the evaporating panels. An additional advantage of the vertical HRSG is provided by the stack effect increasing the power of the gas turbine. Despite the obvious heat-engineering advantages of vertical HRSGs, horizontal HRSGs are predominantly being built in Russia, although the global competition is observed between vertical and horizontal HRSGs, in which the customer’s opinion is decisive.

Keywords: combined-cycle units, gas-turbine units, vertical and horizontal heat-recovery steam generators, evaporating panels and coils, parallel flow and counter-flow of heat carriers, drain system