

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУБАШЕННОГО КОТЛА ЭНЕРГОБЛОКА
158 МВт И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТАКИХ КОТЛОВ В РОССИИ**

© 2025 г. В. М. Супранов^а, *, Б. Р. Соса^б, **, Б. Х. Ф. Соса^а, К. А. Плешанов^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1, Москва, 111250 Россия

^бТЭС “Карлос Мануэль Сеснедес”, г. Сьенфуэгос, Республика Куба

*e-mail: svm-mpei@mail.ru

**e-mail: rafaelsosabeltran@gmail.com

Поступила в редакцию 09.07.2024 г.

После доработки 05.08.2024 г.

Принята к публикации 08.08.2024 г.

В мире существуют паровые котлы различных компоновок (профилей). К наиболее широко применяемым относятся, например, котлы полубашенной компоновки (котлы L-paso). В России нет достаточного опыта проектирования таких котлов, а тем более их практического применения. В статье проанализированы преимущества и недостатки котлов полубашенной компоновки. Их основное преимущество — небольшие габариты в плане, как и у котлов башенной компоновки. Но по сравнению с башенными котлами котлы L-paso имеют меньшую высоту. Проведенный анализ показал, что полубашенный профиль лучше всего подходит для котлов, в которых сжигается газообразное или жидкое топливо. В России, в силу ее климатических условий, полубашенные котлы могут использоваться в качестве замещающих устаревшие газомазутные котлы с естественной циркуляцией (тип E) паропроизводительностью 210–420 т/ч. В статье в качестве примера приводится краткое описание котла L-paso с естественной циркуляцией и промежуточным перегревом пара (тип Ep) известной фирмы “Бабкок — Вилькоккс”. В этом котле, входящем в состав энергоблока мощностью 158 МВт, много лет успешно сжигается сернистый мазут. Разработана адаптированная расчетная модель котла в программе Boiler Designer. На основе этой модели выполнены его многовариантные расчеты. Анализ полученных результатов подтвердил возможность работы котла в широком диапазоне нагрузок с сохранением проектных параметров пара. Показано, что тепловое напряжение сечения топки q_F , тепловое напряжение объема топки q_V и температура дымовых газов на выходе из топки ϑ_t'' заметно превышают значения, допускаемые российскими регламентирующими документами для подобных котлов. Приводится объяснение этому факту. Скорости газов в газоходах котла заметно выше, а скорости газов и воздуха в воздухоподогревателе примерно такие же, как в котлах отечественного производства. Значения приращений энтальпии пара Δh , а также массовой скорости ρw в ступенях пароперегревателя, в основном, соответствуют представлениям российских специалистов.

Ключевые слова: полубашенный котел, L-paso, сернистый мазут, рециркуляция газов, тепловой расчет, Boiler Designer, Power Plant Simulator & Designer, тепловые характеристики топки, скорости теплоносителей

DOI: 10.56304/S0040363624700619

Подавляющее большинство энергетических паровых котлов в России имеют П- или Т-образную компоновку. Поэтому для российских специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией энергетического оборудования, могут быть полезны сведения о котлах с альтернативным профилем.

Полубашенные котлы в зарубежных источниках называют El Paso Type или L-paso. Это связано с тем, что первый такой котел фирма “Бабкок —

Вилькоккс” спроектировала и изготовила для электростанции в г. Эль-Пасо (штат Техас, США).

Некоторые сведения о преимуществах и недостатках, а также рекомендации по применению котлов различных компоновок изложены в [1]. Как башенная, так и полубашенная компоновка позволяет получить минимальную площадь котельной ячейки, но высота котла L-paso заметно меньше, чем у башенного котла.

Полубашенные котлы могут работать на топливе любого вида, но такая компоновка особенно удобна для котлов, сжигающих газ и мазут, в продуктах сгорания которых практически нет золowych частиц. Поэтому в газоходах можно поддерживать высокую скорость газов и повысить интенсивность конвективного теплообмена. Этому способствует сужение топки в верхней части. В результате глубина подъемного и опускного газоходов получаются примерно в 2 раза меньше глубины топки.

Следует отметить, что в газовом тракте котла L-raso продукты сгорания совершают поворот на 180°, что при сжигании угля приводит к возникновению значительной неравномерности концентрации золowych частиц по глубине опускного газохода. Если учесть еще и повышенный уровень их скорости, то такая неравномерность приведет к интенсивному золowому износу труб. Поэтому в полубашенных котлах целесообразно использовать малозольные угли. Сжигание же углей с большим содержанием золы, по возможности, лучше осуществлять в котлах башенной компоновки.

Использование котлов L-raso зависит еще и от климатических условий региона, для которых они проектируются. Для стран с холодным климатом, таких как Россия, на большей части территории обязательной является установка энергетического оборудования в капитальных зданиях. Поэтому полубашенная компоновка из-за увеличения высоты котла (по сравнению с П- и Т-образными компоновками) приведет к удорожанию строительной части электростанции и росту капитальных затрат. В результате в России целесообразным может оказаться только применение небольших газомазутных полубашенных котлов типа E паропроизводительностью 210–420 т/ч.

В регионах и странах с тропическим климатом обычно практикуется открытое размещение оборудования (открытая компоновка). Поэтому в Республике Куба использование котлов L-raso для работы на мазуте можно считать оптимальным вариантом.

В [2] указано, что за период с 1968 по 1983 г. Таганрогским котлостроительным заводом “Красный котельщик” было выпущено 106 котлов E-420-13.8-560ГМ (ТГМ-84Б). Очевидно, что когда-то придется замешать эти котлы. Конечно, у завода есть современный проект подобного котла Г-образной компоновки. Однако использование полубашенных котлов позволило бы увеличить паропроизводительность, например, до 500 т/ч. При этом возможно сохранить габариты котельной ячейки в плане, но высота котла по верхней отметке увеличилась бы примерно на 40–45%. Этот вариант оптимален для нескольких ТГМ-84Б, размещенных в странах,

где возможна открытая компоновка. Но и для остальных ТГМ-84Б он также приемлем.

В России имеется большое количество пылеугольных котлов E-210-13.8-560 и E-220-9.8-540, установленных в 1970–1985 гг. Они физически и морально устарели, многие из них сейчас переведены на сжигание природного газа. Их замена на газовые котлы L-raso E-210-13.8-560 возможна с минимальным увеличением высоты или даже без ее увеличения. Но иногда требуется повышение тепловой мощности при замещении котлов [3]. При использовании полубашенных котлов можно довести их паропроизводительность до 250 т/ч, но увеличение высоты будет более существенно, примерно на 20%.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полубашенные котлы Ep-535-12.8-540M, разработанные фирмой “Бабкок – Вилькокс”, входят в состав двух энергоблоков электрической мощностью 158 МВт, которые эксплуатируются на ТЭС “Карлос Мануэль Сеспедес” в г. Сьенфуэгос (Республика Куба) с 1978 г. Энергоблоки работают постоянно и регулируют частоту кубинской электросети.

Котел Ep-535-12.8-540M (рис. 1) спроектирован для работы на высокосернистом мазуте, который используется в качестве топлива практически на всех электростанциях Кубы. Котел с естественной циркуляцией, однобарабанный, газоплотный, предназначен для работы под наддувом. Он подвешен на собственном каркасе, поэтому при переходе в горячее состояние свободно расширяется вниз от точек подвески.

Газоплотные стены котла почти полностью состоят из мембранных испарительных экранов. Исключение составляет верхняя часть заднего экрана котла. Здесь по каждой второй трубе пар из барабана подводится к нижнему коллектору холодной конвективной ступени (ХКС) пароперегревателя. Но температура в этих трубах значительно превышает температуру насыщения. Поэтому все трубы в экранной системе расширяются одинаково, и в ней не возникает тепловых напряжений. В верхней части внутри котла установлен разделительный экран, который заканчивается четырехрядным фестом. Этот экран отделяет подъемный газоход от опускного газохода.

Открытая призматическая топка в верхней части имеет конфузорный участок, образованный трубами фронтального и разделительного экранов, чтобы продукты сгорания плавно втекали в подъемный газоход. Девять вихревых горелок скомпонованы в три яруса на фронтальной стене. Для снижения выбросов вредных веществ и как средство воздействия на температуру перегретого пара в нижнюю часть топки вводятся газы рециркуляции. Отбор этих газов происходит за котлом,

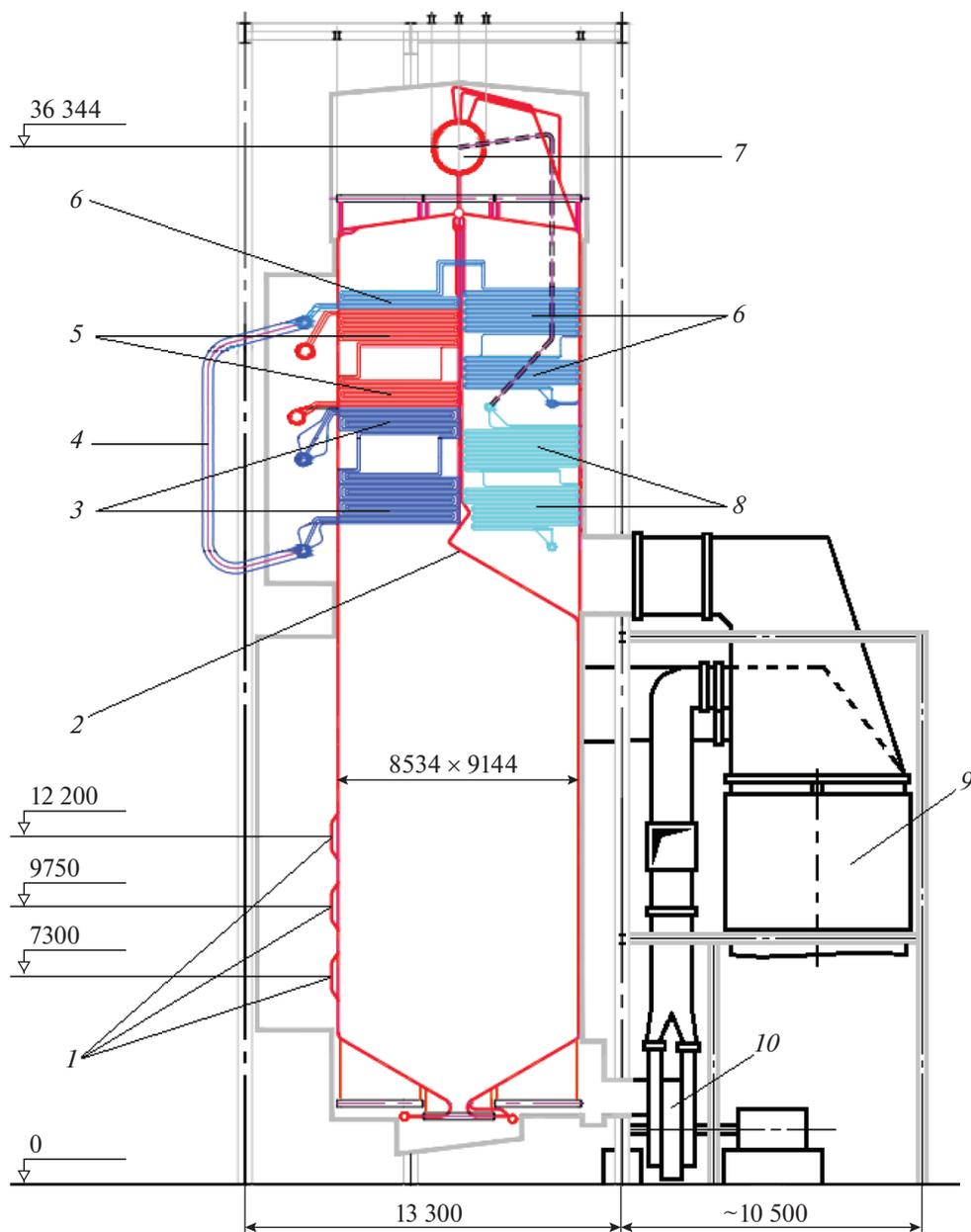


Рис. 1. Котел Ep-535-12.8-540M (продольный разрез).

1 – амбразуры горелок; 2 – разделительный экран; 3 – ГКС; 4 – место установки впрыска по тракту высокого давления; 5 – КПНД; 6 – ХКС; 7 – барабан; 8 – экономайзер; 9 – РВП; 10 – дымососы рециркуляции газов

т.е. перед регенеративными воздухоподогревателями (РВП).

В подъемном газоходе продукты сгорания последовательно протекают через горячую конвективную ступень (ГКС) пароперегревателя высокого давления, конвективный пароперегреватель низкого давления (КПНД), небольшую часть ХКС. После этого они разворачиваются на 90° в первой поворотной камере, проходят четырехрядный фестон, разворачиваются еще на 90° во второй поворотной камере и попадают в опускающей газоход.

В верхней части этого газохода расположены два пакета ХКС (основная часть) и два пакета экономайзера (ЭК). Ниже ЭК газы разворачиваются на 90° и через однорядный фестон в заднем экране выходят из котла. Дальнейшее охлаждение газов до температуры примерно 160°C происходит в двух регенеративных воздухоподогревателях.

Питательная вода поступает в некипящий экономайзер. Он противоточный, изготовлен из труб типоразмером 57×4.5 мм, расположение труб в пучке коридорное. Далее вода следует в барабан

внутренним диаметром 1676 мм и толщиной стенки примерно 100 мм, с которым связаны контуры циркуляции котла. Из них пароводяная смесь попадает в барабан, где происходит отделение пара, и уже насыщенный пар из него направляется в холодную конвективную ступень.

Основная часть ХКС расположена в опускном газоходе. Для удобства ремонта и обслуживания она разделена на два пакета. Небольшая часть холодной конвективной ступени размещена в конце подъемного газохода. При этом паропроводы к ГКС получают короче. В этих паропроводах для регулирования температуры перегрева установлены впрыски питательной воды. Вся ХКС противоточная, расположение труб типоразмером 57×4.5 мм в пучке коридорное.

Горячая конвективная ступень для удобства ремонта и обслуживания также разделена на два пакета. Эта ступень коридорная, прямоточная, в основном изготовлена из труб типоразмером 57×6.4 мм. После ГКС пар температурой 540°C подается в турбину.

На входе в КПНД также предусмотрен впрыск питательной воды. Этот конвективный пароперегреватель изготовлен в основном из труб типоразмером 57×4.5 мм. Он коридорный, противоточный и разделен по высоте на два пакета для удобства ремонта и обслуживания. После КПНД пар температурой 540°C возвращается в турбину.

Котел укомплектован системой автоматического регулирования рабочих параметров и средствами очистки поверхностей нагрева от загрязнений.

Особенностью этого котла является отсутствие подвесных труб. Весовая нагрузка от конвективных поверхностей нагрева передается на фронтальный, разделительный и задний экраны через систему специальных опор. Все экраны топki и боковые экраны по всей высоте котла изготовлены из труб типоразмером 63.5×4.9 мм, в области размещения конвективных поверхностей фронтальный, разделительный и задний экраны — из труб диаметром 75.4 мм с разной толщиной стенки, которая зависит от весовой нагрузки, передаваемой на трубы. Все экранные трубы выполнены из углеродистой стали.

Как видно на рис. 1, между выходной частью ГКС и выходной частью КПНД не предусмотрен ремонтный разъем. Очевидно, это сделано для уменьшения общей высоты котла. Но именно в выходных частях пароперегревателей вероятность повреждения труб самая высокая. Поэтому отсутствие такого разъема осложняет ремонт котла. Ремонтного разъема нет также между выходной частью ХКС и входной частью КПНД, но это не имеет большого значения, поскольку вероятность повреждений труб здесь гораздо ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА КОТЛА И ИХ АНАЛИЗ

Для исследования работы котла была создана его расчетная модель. При этом применялись программа Boiler Designer (зарубежное название Power Plant Simulator & Designer) [4] и методика, изложенная в [5]. Такой подход неоднократно использовался, в том числе для расчета характеристик котлов, сжигающих мазут и газ [2, 6, 7]. Алгоритм создания подобных расчетных моделей изложен в [8]. Конструктивные параметры котла были взяты из технической документации. Для настройки модели использовались опытные данные, полученные при эксплуатации энергоблоков.

После настройки модели были выполнены расчеты котла по программе Boiler Designer в диапазоне рабочих нагрузок от 100 до 50%. Для проведения расчета использовались данные об изменении температуры питательной воды $t_{п.в.}$, температуры пара низкого давления (НД) $t'_{нд}$ на входе в котел, давления пара низкого давления на выходе из котла $p''_{нд}$, расхода пара низкого давления $D_{нд}$ в зависимости от нагрузки. Эти данные были получены из анализа режимов работы энергоблока. В качестве расчетного топлива был принят мазут с низкой теплотой сгорания на рабочую массу $Q_n^p = 40.594$ МДж/кг (9696 ккал/кг) и содержанием серы $S^p = 2.2\%$.

Расчеты проводились для нагрузок 100, 85, 75, 60 и 50%. Актуальными для электростанции являются нагрузки 100, 75 и 50%. Две другие были нужны для корректного представления результатов расчета в графическом виде. Результаты расчета представлены в табл. 1.

При снижении нагрузки температура на выходе из топki ϑ_t'' становится ниже, поэтому уменьшается температурный напор в ступенях пароперегревателя Δt . Одновременно сокращается расход топлива и в топке образуется меньше продуктов сгорания. В результате, если не принять никаких мер, снизятся скорости газов в ступенях пароперегревателя, уменьшатся коэффициент теплоотдачи от газов и коэффициент теплопередачи k . Поскольку количество тепла, воспринятое ступенью пароперегревателя, определяется по формуле $Q = k\Delta tH$, где H — площадь теплообменной поверхности, то в такой ситуации Q будет уменьшаться. Это приведет к снижению температуры перегретого пара $t_{пе}$ и особенно пара низкого давления $t''_{нд}$, так как ГКС получает тепло излучением из топki, а в КПНД такое тепло практически не поступает.

Поддержание температуры перегретого пара $t_{пе}$ и особенно пара низкого давления $t''_{нд}$ на должном уровне при снижении нагрузки обеспечивается постепенным повышением коэффициента

Таблица 1. Основные результаты расчетов котла Еп-535-12.8-540М

Параметр	Нагрузка, %		
	100	75	50
Паропроизводительность D , т/ч	535.0	401.3	267.5
Давление, МПа:			
питательной воды $p_{п.в}$	13.79	13.36	13.07
перегретого пара $p_{пе}$	12.84	12.84	12.84
в барабане котла $p_б$	13.61	13.27	13.02
Давление пара НД, МПа:			
на входе в котел $p'_{НД}$	2.88	2.13	1.41
на выходе из котла $p''_{НД}$	2.76	2.06	1.37
Температура, °С:			
питательной воды $t_{п.в}$	263	248	225
перегретого пара $t_{пе}$	540	540	540
Температура пара НД, °С:			
на входе в котел $t'_{НД}$	340	328	304
на выходе из котла $t''_{НД}$	540	540	534
Расход, т/ч:			
пара низкого давления $D_{НД}$	430.7	322.0	214.9
воды на продувку $D_{прод}$	3.50	2.63	1.75
Расход мазута B , т/ч	36.473	28.143	19.745
Коэффициент избытка воздуха в топке α_T	1.035	1.050	1.135
Температура газов на выходе, °С, из:			
топки ϑ'_T	1294	1195	1065
ГКС $\vartheta''_{ГКС}$	1084	1003	902
КПНД $\vartheta''_{КПНД}$	843	783	711
ХКС $\vartheta''_{ХКС}$	515	488	461
ЭК $\vartheta''_{ЭК}$	367	346	321
Температура уходящих газов ϑ_{yx} , °С	160	152	152
Коэффициент полезного действия котла η_k , %	93.105	93.054	92.084
Коэффициент рециркуляции газов r	0.19	0.31	0.50
Скорость газов, м/с, в:			
ГКС1 $w_{ГКС1}$	23.6	19.3	15.0
ГКС2 $w_{ГКС2}$	21.5	17.6	13.7
КПНД2 $w_{КПНД2}$	26.8	22.0	17.3
КПНД1 $w_{КПНД1}$	24.4	20.0	15.8
ХКС3 $w_{ХКС3}$	22.4	18.5	14.7
ХКС2 $w_{ХКС2}$	27.9	23.1	18.6
ХКС1 $w_{ХКС1}$	24.4	20.4	16.6

Таблица 1. Окончание

Параметр	Нагрузка, %		
	100	75	50
Температура воздуха, °С:			
перед РВП $t'_{РВП}$	90	90	100
за РВП $t''_{РВП}$	322	305	286
Впрыск в тракт, т/ч:			
высокого давления $D_{впр\ ВД}$	0.147	5.906	8.879
низкого давления $D_{впр\ НД}$	1.103	0	0.068
Приращение энтальпии пара, кДж/кг, в:			
ГКС1 $\Delta h_{ГКС1}$	255	264	273
ГКС2 $\Delta h_{ГКС2}$	93	94	95
КПНД1 $\Delta h_{КПНД1}$	266	276	299
КПНД2 $\Delta h_{КПНД2}$	195	196	201
Расход, т/ч:			
воздуха за вентиляторами $G''_{вен}$	595	470	352
уходящих газов $G_{ух}$	633	499	373

избытка воздуха на выходе из топки α_t и, в большей степени, увеличением коэффициента рециркуляции газов r . Эти мероприятия позволяют повысить расход газов на участке газового тракта, охваченном рециркуляцией. В результате скорости газов в ступенях пароперегревателя увеличиваются и они воспринимают большее количество тепла.

На рис. 2 показано, как изменяются коэффициент избытка воздуха на выходе из топки α_t и коэффициент избытка воздуха в уходящих газах за РВП $\alpha_{ух}$ при снижении нагрузки. Видно, что $\alpha_{ух} > \alpha_t$, несмотря на то что газовый тракт котла находится под избыточным давлением. Поскольку давление в воздушном тракте больше, существуют перетоки воздуха в воздухоподогревателе из воздушного тракта в газовый.

Но только увеличения α_t для поддержания $t_{пе}$ и $t''_{НД}$ недостаточно. На рис. 3 показано, как изменяется при снижении нагрузки коэффициент рециркуляции r . На нагрузке 100% было принято значение $r = 0.19$ для обеспечения впрысков по трактам высокого и низкого давления на уровне наблюдаемых при эксплуатации котла. На пониженных нагрузках значение r подбиралось таким образом, чтобы температура $t''_{НД}$ поддерживалась на требуемом уровне при $D_{впр\ НД}$ близком к нулю.

Из представленных в табл. 1 данных следует, что параметры пара высокого и низкого давления на выходе из котла поддерживаются на нуж-

ном уровне во всем рабочем диапазоне нагрузок. При нагрузке 50% температура пара промежуточного перегрева $t''_{НД}$ равна 534°С, а при 60%-ной нагрузке – 535°С, но это было предусмотрено еще при проектировании энергоблока и котла. Изменение кривизны графика на рис. 3 объяс-

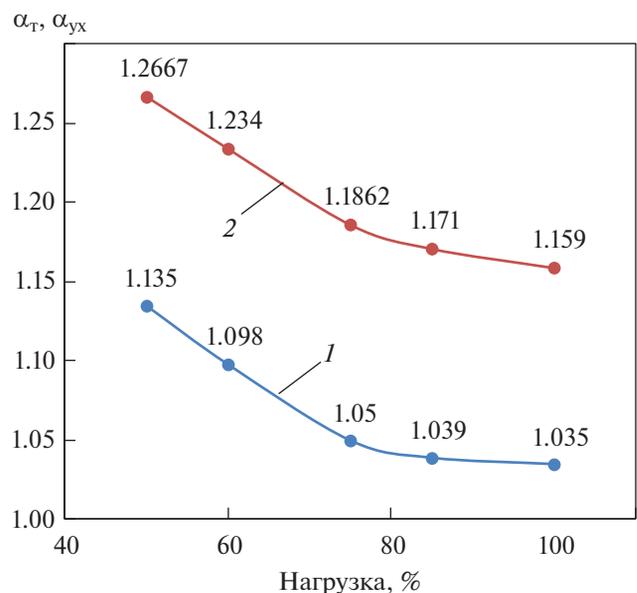


Рис. 2. Изменение коэффициентов избытка воздуха в топке α_t (1) и в уходящих газах $\alpha_{ух}$ (2) в зависимости от нагрузки

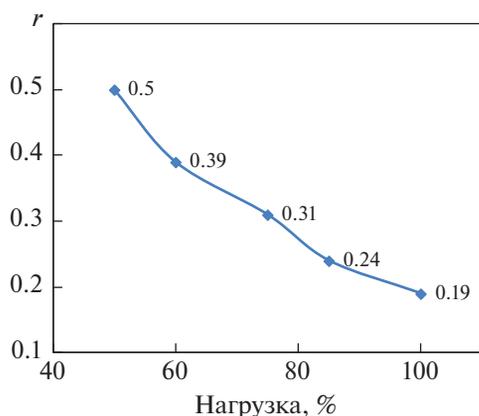


Рис. 3. Изменение коэффициента рециркуляции газов r в зависимости от нагрузки

няется именно пониженными значениями $t''_{\text{нд}}$ на нагрузке 60 и 50%.

Важная задача при сжигании высокосернистого мазута — не допустить возникновения низкотемпературной коррозии поверхности регенеративного воздухоподогревателя или хотя бы снизить интенсивность ее протекания до минимума. Для этого должен обеспечиваться предварительный подогрев воздуха перед РВП на уровне 90°C (первое условие), что не противоречит рекомендациям [9]. Вторым необходимым условием, по данным электростанции, является обеспечение температуры уходящих газов ϑ_{yx} не ниже 150°C . На рис. 4 показано, какие значения $t'_{\text{рвп}}$ были приняты при расчете и как при этом изменяется ϑ_{yx} в зависимости от нагрузки. Увеличение подогрева воздуха в калориферах до 100°C на нагрузке менее 70% позволяет добиться выполнения второго условия.

Несмотря на высокую температуру уходящих газов, тепловой КПД котла находится в диапазоне от 92.084 до 93.105 (см. табл. 1). На графике зависимости $\eta_{\text{к}} = f(D)$, представленной на рис. 5, видно, что кривая имеет максимум 93.128% на нагрузке 85%. Экстремальный характер кривой обусловлен изменением потери тепла с уходящими газами q_2 . До нагрузки 85% температура ϑ_{yx} монотонно снижается, а до нагрузки 80% α_{yx} увеличивается незначительно. Поэтому при уменьшении нагрузки от 100 до 85% потери тепла q_2 сокращаются, а КПД растет. При снижении нагрузки от 85 до 50% коэффициент α_{yx} увеличивается более значительно, кроме того, температура уходящих газов не падает из-за роста температуры воздуха перед РВП. Поэтому в этом диапазоне наблюдаются существенное повышение q_2 и снижение КПД котла.

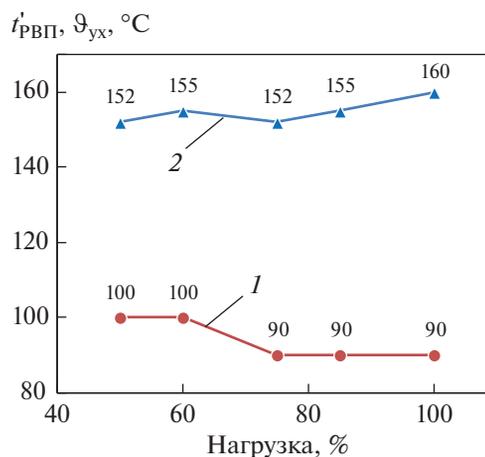


Рис. 4. Изменение температуры воздуха перед РВП $t'_{\text{рвп}}$ (I) и температуры уходящих газов ϑ_{yx} (2) в зависимости от нагрузки

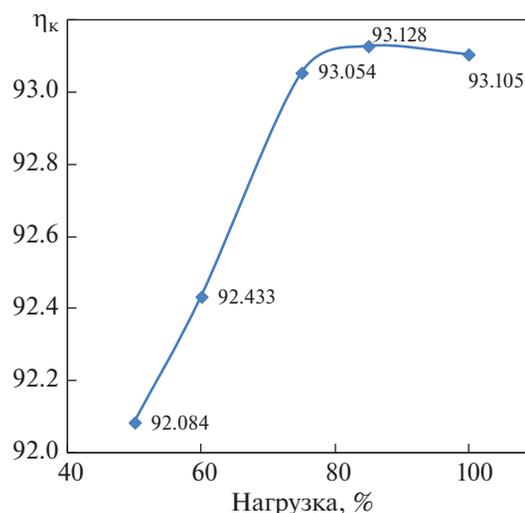


Рис. 5. Изменение КПД котла $\eta_{\text{к}}$ в зависимости от нагрузки

Создание расчетной модели котла открывает следующие возможности. Во-первых, ее можно использовать для оптимизации режимов работы котла. Во-вторых, она позволит оценить влияние удаления и заглушки вышедших из строя труб на работу котла. Это важно, так как не всегда имеются время и возможность для проведения полноценного ремонта.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОТЛА

Для российских специалистов, которые занимаются проектированием энергетического оборудования, могут быть интересны следующие особенности рассматриваемого котла.

Расчетное значение теплового напряжения поперечного сечения топки q_F равняется 5.3 МВт/м^2 , тогда как по российскому регламентирующему документу [10] рекомендуемое значение составляет 4.0 МВт/м^2 . Ограничение по q_F в котлах, сжигающих жидкое и газообразное топливо, связано с интенсивностью образования отложений на внутренней поверхности труб. Для энергетического оборудования, выпускаемого западными фирмами, предусматривается более высокое качество питательной воды. Поэтому значение q_F может быть выше, а размеры топки в плане и длина барабана меньше. Таким образом, благодаря повышению качества водоподготовки снижается металлоемкость котла.

Из-за более высокого качества питательной воды в котле используется одноступенчатая система испарения, тогда как в барабанных котлах высокого давления советского и российского производства она двухступенчатая или даже трехступенчатая. Небольшая непрерывная продувка предусмотрена (см. табл. 1). В отличие от советских и российских котлов, в этом агрегате нет четко выраженного деления испарительной поверхности нагрева на отдельные контуры циркуляции. Испарительные экраны, разделенные на отдельные панели по условию транспортировки, включены в один сложный контур циркуляции. Подвод среды осуществляется по двум опускающим стоякам, имеющим типоразмер $558.8 \times 35.0 \text{ мм}$. Половина испарительных труб подключена напрямую к барабану, а оставшаяся часть труб подведена через общие сборные коллекторы, объединяющие боковые экраны, и каждую вторую трубу фронтального, разделительного и заднего экранов. Такое нехарактерное подключение испарительных экранов возможно только при соблюдении высокой равномерности обогрева испарительных труб и большом тепловом напряжении поперечного сечения топки q_F .

Расчетное значение теплового напряжения объема топки q_V составило 296 кВт/м^3 . Согласно [10], рекомендуемое значение равно 200 кВт/м^3 . Ограничение по q_V связано с полнотой выгорания топлива. При более совершенной организации топочного процесса q_V может быть выше, а объем топки меньше. На котлах западных фирм управление топочным процессом обычно автоматизировано, а сами горелки технологически более сложны. Поэтому можно допустить повышение q_V , уменьшение объема топки и снизить таким образом металлоемкость котла.

Из-за уменьшения объема топки температура на выходе из нее выше, чем в барабанных котлах высокого давления советского и российского производства. Для рассматриваемого полубашен-

ного котла $\vartheta_T'' = 1294^\circ\text{C}$ (см. табл. 1), а для газомазутных котлов типов Е и Еп советского и российского производства она обычно составляет примерно 1250°C при сжигании газа. При работе на мазуте ϑ_T'' снижается примерно на $50\text{--}60^\circ\text{C}$ из-за светящегося пламени в топке и интенсификации радиационного теплообмена.

Скорости газов в подъемном и опускающем газоходах рассматриваемого котла на нагрузке 100% высокие – от 21 до 28 м/с. Для газомазутных котлов типов Е и Еп советского и российского производства они обычно меньше 20 м/с.

При высоких значениях скоростей газов и температуры на выходе из топки интенсивность конвективного теплообмена и температурный напор Δt в ступенях пароперегревателя повышаются. Поэтому котел Еп-535-12.8-540М спроектирован без полурadiационных ширм, и это отличает его от советских и российских газомазутных котлов, в которых такие ширмы есть всегда. В качестве примера можно привести котел БКЗ-420-13.8-560ГМН со смкнутой П-образной компоновки, способный работать под наддувом.

Как уже упоминалось, котел выполнен без подвесных труб. Это упрощает его конструкцию и тепловую схему и, возможно, приводит к снижению металлоемкости. Но при этом ЭК, ХКС и ГКС для придания трубным пучкам жесткости изготовлены из труб диаметром 57 мм. Это не характерно для барабанных котлов высокого давления советского и российского производства, в которых для таких поверхностей нагрева используются трубы меньшего диаметра, обычно 32 мм. При этом есть опыт выполнения газоплотных котлов без подвесных труб. Например, их нет в котле БКЗ-420-13.8-560ГМН. Но схема передачи весовой нагрузки на стены опускающего газохода выбрана другая, поэтому ступени конвективного пароперегревателя и экономайзера изготовлены из труб диаметром 32 мм.

Очевидно, что многие особенности конструкции полубашенного котла энергоблока 158 МВт вызваны именно стремлением к снижению металлоемкости. В СССР стоимость стали была невысокой. Поэтому при проектировании котлов разработчики не стремились любым путем уменьшить металлоемкость, а старались сократить эксплуатационные затраты (водоподготовка, скорости газов, от которых зависит аэродинамическое сопротивление газового тракта котла) и обеспечить хорошую ремонтпригодность (обязательные ремонтные разъемы между поверхностями нагрева). Пока эти принципы традиционно сохраняются и в России. Но, скорее всего, в дальнейшем все более актуальной будет задача снижения металлоемкости.

Таблица 2. Массовые скорости рабочего тела w , кг/(м²·с)

Поверхность нагрева	Расчетное значение на нагрузке 100%	Рекомендуемые значения [11]
ЭК (некипящий)	472	500–700
ХКС	462	700–800
ГКС1	835	950–1200
ГКС2	1218	950–1200
КПНД1	374	180–220
КПНД2	358	250–320

Скорости теплоносителей в регенеративных воздухоподогревателях соответствуют рекомендациям [5]. Массовые скорости рабочего тела рассматриваемого котла представлены в табл. 2, в ней же для сопоставления приводятся рекомендуемые в [11] значения. Из приведенных данных следует, что для экономайзера, ГКС2 и КПНД2 расчетные значения близки к рекомендуемым в [11]. Для холодной конвективной ступени w существенно ниже этих рекомендованных значений, а для КПНД1 заметно выше. Нижний предел рекомендуемого диапазона массовой скорости связан с обеспечением надежной работы металла труб. Поэтому ГКС1, КПНД1 и ХКС изготовлены из стали, аналогичной 12Х1МФ, а ЭК – из углеродистой стали. То же самое характерно для котлов советского и российского производства.

Следует отметить, что представленные в табл. 1 расчетные приращения энтальпии пара Δh для некоторых ступеней пароперегревателя в основном соответствуют значениям, характерным для котлов советского и российского производства.

Не совсем понятно, почему газы рециркуляции в полубашенном котле энергоблока 158 МВт вводятся в топку в нижней ее части. Подобным образом ввод газов рециркуляции был организован на первых советских котлах БКЗ-420-13.8-560ГМН. Но затем их стали подавать в горелки вместе с воздухом, потому что это позволяет дополнительно снизить выбросы оксидов азота. Единственным объяснением могут быть характеристики используемых на рассматриваемом котле дымососов рециркуляции газов. Котел работает под наддувом, и давление воздуха перед горелками существенно выше, чем давление в топке. Поэтому подать газы рециркуляции в топку проще.

ВЫВОДЫ

1. Полубашенная компоновка хорошо подходит для газомазутных котлов. При минимальных раз-

мерах котельной ячейки и умеренной высоте котла можно добиться высокой эффективности теплообмена. Поэтому котлы L-paso могут быть удачным решением при замещении устаревшего оборудования на существующих российских ТЭЦ и в дружественных странах. Подходящими объектами для такого замещения могут стать ТГМ-84Б и пылеугольные котлы Е-210-13.8-560 и Е-220-9.8-540 при переходе на сжигание газа.

2. Проведенные расчетные исследования показали, что рассмотренный котел может работать в широком диапазоне нагрузок (50–100%) с высоким КПД – от 92.084 до 93.105% при поддержании проектных параметров первичного и вторичного пара. Значит, применение полубашенной компоновки может быть эффективным решением даже для такого проблемного топлива, как сернистый мазут.

3. Выполнена работа по критическому осмыслению западных проектных решений и сопоставлению их с существующими советскими и российскими наработками. Исходя из ее результатов, можно заключить, что создание отечественных полубашенных котлов возможно с применением традиционных советских и российских проектных разработок: полурadiационных ширм, подвесных труб, труб диаметром 60 мм для испарительных поверхностей котлов типов Е и Еп, труб диаметром 32 мм для пароперегревателей высокого давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изюмов М.А., Супранов В.М., Плешанов К.А. Компоновки паровых котлов и организация движения среды в экранах ограждения. М.: Изд-во МЭИ, 2022.
2. Расчетно-экспериментальное обоснование глубокой разгрузки котла Е-420-13.8-560ГМ / А.Н. Тугов, В.М. Супранов, Е.В. Сомова, В.А. Верещетин // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 87–98. <https://doi.org/10.56304/S0040363624010089>
3. Обоснование и выбор основных проектных решений по котлу Е-160-3.9-440 для ГЭС-1 АО “Мосэнерго” / В.А. Двойнишников, М.А. Изюмов, В.М. Супранов, В.И. Щелоков, С.А. Евдокимов // Теплоэнергетика. 2003. № 12. С. 26–32.
4. Расчет котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов / Г.И. Доверман, Б.Л. Шельгин, А.В. Мошкарин, Ю.В. Мельников. Иваново: ИГЭУ, 2007.
5. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973.
6. Опыт внедрения внутритопочных методов снижения NO_x на котлах Е-320-13.8-560ГМ: проблемы и пути их решения / А.Н. Тугов, В.М. Супранов, М.А. Изюмов, В.А. Верещетин, Ю.М. Усман, А.С. Натальин // Теплоэнергетика. 2017. № 12.

- С. 27–34.
<https://doi.org/10.1134/S0040363617120098>
7. **Обоснование** возможности сжигания мазута в качестве резервного топлива на пылеугольном котле П-50Р Каширской ГРЭС / А.Н. Тугов, В.М. Супранов, М.А. Изюмов, Е.В. Сомова, В.А. Верешетин // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 34–41.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620110107>
 8. **Изюмов М.А., Супранов В.М.** Проведение согласованных тепловых расчетов котла и систем пылеприготовления на базе адекватных расчетных моделей // Труды XVIII междунар. науч.-техн. конф. “Информационные средства и технологии”. Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 166–173.
 9. **СО 153-34.20.501-2003.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: Энергосервис, 2003.
 10. **Методические** указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / под ред. Э.Х. Вербовецкого, Н.С. Жмерика. СПб.: НПО ЦКТИ, 1996.
 11. **Тепловые** и атомные электрические станции: справ. Т. 3 / под ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 2003.

Investigation into Operation of a Semitower Boiler of a 158-MW Power Unit and Prospects for Application of Such Boilers in Russia

V. M. Supranov^{a, *}, B. R. Sosa^{b, **}, B. Kh. F. Sosa^a, and K. A. Pleshanov^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b Carlos Manuel Cespedes TPP, Cienfuegos, Republic of Cuba

*e-mail: svm-mpei@mail.ru

**e-mail: rafaelosabeltran@gmail.com

Abstract—Steam boilers of various arrangements (or profiles) exist in the world. The most widely used ones include, for example, semitower boilers (or L-paso boilers). In Russia, there is not sufficient experience in designing such boilers, especially in their practical application. The paper analyzes advantages and disadvantages of semitower boilers. As with tower boilers, their main advantage is a small footprint. However, compared to tower boilers, the L-paso boilers have a lower height. According to the performed analysis, the semitower configuration is best suited to boilers fired with gaseous or liquid fuel. In Russia, due to its climatic conditions, semitower boilers can be used for replacements of obsolete (type E) natural circulation gas-and-fuel oil-fired boilers with a steam output of 210–420 t/h. As an example, the paper presents a brief description of the L-paso (type Ep) natural circulation reheat boiler manufactured by the well-known Babcock-Wilcox Co. This boiler, which is a part of a 158-MW power unit, has been successfully fired with sulfur fuel oil for many years. A customized numerical model of the boiler was developed in the Boiler Designer software package. Multivariant calculations of the boiler were performed on the basis of this model. An analysis of the predictions has confirmed that the boiler can operate in a wide range of loads while maintaining the design steam conditions. The furnace heat release rate q_F , the furnace cross-section heat release rate q_V , and the flue gas temperature at the furnace outlet ϑ_T'' have been demonstrated to considerably exceed the values allowed by the applicable Russian regulations for similar boilers. This fact is explained. The gas velocities in the boiler gas ducts are noticeably higher, and the gas and air velocities in the air heater are approximately the same as in the Russian-made boilers. The steam enthalpy increments Δh and the mass velocity ρw in the superheater stages basically correspond to the concepts of Russian specialists.

Keywords: semitower boiler, L-paso, sulfur fuel oil, gas recirculation, thermal design, Boiler Designer, Power Plant Simulator & Designer, furnace thermal characteristics