



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.181

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-303-317>

## Исследование и модернизация тепловой схемы котла ТГМЕ-444 с целью повышения надежности и экономичности его работы

© **А.Н. Безгрешнов, Н.В. Усиков, Е.М. Дьяконов**

Южно-Российский государственный политехнический университет  
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

**Резюме:** Цель – изучение основных проектных решений, заложенных в конструкцию котла ТГМЕ-444, обеспечивающих надежную работу поверхностей нагрева и высокие экономические показатели при сжигании мазута. С 1973 по 1993 г. котлы работали исключительно на мазуте, а с 1993 г. и по настоящее время – только на природном газе. Длительный опыт эксплуатации котлов при сжигании природного газа показал, что по условиям надежности температурного режима ширмоконвективного пароперегревателя опускного газохода котлы не могут работать с нагрузками более ~117 кг/с (420 т/ч). Причины повышенных вспышек при сжигании природного газа обусловлены принятыми в проекте решениями по составу поверхностей нагрева котла. Основные технические решения по тепловой схеме котла принимались по наиболее тяжелому топливу – мазуту. Рассмотрено несколько вариантов тепловых схем, сформированных с учетом возможностей их исполнения в существующих габаритах топки и конвективных газоходов котла с учетом перевода его на сжигание природного газа: замена пароперегревательных топочных ширм на парообразующие с включением их в схему циркуляции котла; увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева (при снижении расхода на вспышки) введением в топку газов рециркуляции, отбираемых после экономайзера. Расчеты выполнялись с использованием программ теплового и гидравлического расчета паровых котлов TRAKT, Гидравлика, Boiler Designer. По результатам рассчитанных вариантов было установлено, что изменением конструкции и тепловосприятия пароперегревательных поверхностей нагрева котла можно добиться значительного снижения расходов на вспышки, снизить тепловую развертку и повысить надежность их работы с сохранением высокого уровня экономических показателей; наибольший эффект снижения расходов на вспышки достигается в случаях, когда пароперегревательные топочные ширмы заменяются на парообразующие с включением их в схему циркуляции котла; увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева за счет перевода пароперегревательных ширм в топку в парообразующие приводит к увеличению недогрева воды на выходе из экономайзера, что повышает устойчивость его работы.

**Ключевые слова:** паровой котел ТГМЕ-444, вихревая топка, поверхности нагрева, тепловосприятие водосодержащих и парогенерирующих поверхностей, совершенствование тепловой схемы

**Информация о статье:** Дата поступления 10 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 30 января 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2020 г.

**Для цитирования:** Безгрешнов А.Н., Усиков Н.В., Дьяконов Е.М. Исследование и модернизация тепловой схемы котла ТГМЕ-444 с целью повышения надежности и экономичности его работы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 303–317. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-303-317>

## Research and modernisation of TGME-444 boiler thermal circuit in order to increase its reliability and efficiency

**Alexander N. Bezgreshnov, Nikolay V. Usikov, Evgeniy M. Dyakonov**

Platov South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

**Abstract:** This paper is aimed at studying the main design solutions of the TGME-444 boiler, which ensure reliable operation of heating surfaces and high economic indicators when burning fuel oil. In the Russian context, such boilers relied on fuel oil from the period 1973-1993, whereas, from 1993 to the present time, the fuel was switched to natural gas. Extensive experience of boiler operation when burning natural gas shows that, according to the temperature regime reliability of the curtain convective superheater of the drop flue gas duct, the boilers cannot operate with the loads more than ~117 kg/s (420 t/h). The reasons for the increased injections when burning natural gas are due to the project decisions on the composition of boiler heating surfaces. The main engineering solutions for the boiler thermal circuit were optimised for fuel oil as the heaviest fuel. Thus, consideration was given to the several variants of thermal circuits formed

with regard to their potential implementation within existing furnace and convective gas duct configurations taking the conversion to natural gas fuel into account. These are: replacement of steam superheating furnace curtains with steam generators and inclusion of the latter in the boiler circulation cycle; increase in heat absorption of water-containing heating surfaces (under reduced injection flow) by the introduction of recirculation gases withdrawn after the economiser into the furnace. Calculations were performed using TRAKT, Hydraulics, Boiler Designer programs for thermal and hydraulic calculation of steam boilers. The results of calculated variants informed changes in the design and heat absorption of boiler reheating surfaces that significantly reduced the cost of injections and thermal upset, whereas operational reliability was able to be increased while maintaining a high-level of economic indicators. The greatest effect of reducing injection costs is achieved in cases when reheating furnace curtains are replaced by steam generating curtains, with the latter included in a boiler circulation scheme. Thus, increasing the heat absorption of water-containing heating surfaces by converting superheating furnace curtains into steam-generating curtains decreases water overheating at the economiser outlet, improving operational stability.

**Keywords:** TGME-444 steam boiler, vortex furnace, heating surfaces, thermal absorption of water-containing and steam-generating surfaces, thermal circuit improvement

**Information about the article:** Received December 10, 2019; accepted for publication January 30, 2020; available online April 30, 2020.

**For citation:** Bezgreshnov AN, Usikov NV, Dyakonov EM. Research and modernisation of TGME-444 boiler thermal cycle in order to increase its reliability and efficiency. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(2):303–317. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-303-317>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы экономии затрат на производство электрической и тепловой энергии всегда были в центре внимания теплотехников. Исчерпание или ухудшение качества проектных запасов топлива (твердых, жидких и газообразных), ввод в оборот новых видов, например, твердых бытовых отходов, отходов различных производств (в частности, нефтяного кокса) и т.п., вопросы охраны окружающей среды, структурные изменения цен на первичное топливо, поступающее на электростанции, придают особое внимание необходимости совершенствования энергетического оборудования. Во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ) систематически проводятся международные конференции, посвященные решению возникающих задач [1, 2], очередная намечена на октябрь 2020 г.

Исследование и анализ отдельных систем тепловых электростанций и котельных проводились отечественными учеными и конструкторами – Н.В. Головановым, Л.И. Павленко, А.А. Паршиным, Б.М. Шлейфером, В.В. Митором, В.А. Двойнишниковым, Ю.М. Липовым и др. Исследования, посвященные описанию технологических схем, режимам работы оборудования и практическим вопросам его эксплуатации, разработке методов расчета, проводились в ведущих научно-исследовательских институтах страны, конструкторских предприятиях и ВУЗах<sup>1-3</sup> [3–14]. Были в основном разработаны теоретические вопросы формирования тепловых схем котлов, применяемые в практике проектирования<sup>1,4,5</sup> [10], в частности на Таганрогском котельном заводе «Красный котельщик».

Много внимания этим вопросам уделяется и за рубежом [15–20], хотя при-

<sup>1</sup> Безгрешнов А.Н., Павленко Л.И., Паршин А.А., Шлейфер Б.М. Выбор тепловой схемы при проектировании парогенераторов: учеб. пособ. Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1979. 79 с.

<sup>2</sup> Акимов Ю.И., Васильев А.В., Антропова Г.В. Тепловой расчет котлоагрегатов: учеб. пособ. Саратов: Изд-во СГТУ, 2006. 95 с.

<sup>3</sup> Гиль А.В. Формирование исходных данных для проектирования и моделирования паровых котлов: учеб. пособ. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 72 с.

<sup>4</sup> Безгрешнов А.Н. Принятие проектных решений при проектировании паровых котлов: учеб. пособ. Новочеркасск: Изд-во НГТУ, 1997. 124 с.

<sup>5</sup> Изюмов М.А. Методология принятия технических решений на стадии проектирования паровых котлов: учеб. пособ. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 108 с.



меняемые подходы для решения возникающих задач довольно сильно отличаются от принятых в России. При проектировании котельных установок применяются методы численного моделирования процессов сжигания топлива, теплообмена, аэродинамики. Широко используются методы термоэкономической оптимизации котельных установок, особенно при проектировании парогазовых блоков.

Основные характеристики котла ТГМЕ – 444 (конструкция, тепловая схема, результаты работы на мазуте) взяты по данным [3–6, 8]. Разработка вариантов реконструкции котла при замене мазута на природный газ потребовала фактических данных о параметрах рабочей среды и продуктах сгорания в различных режимах. Из-за невозможности реализации требуемых режимов по техническому состоянию котла (невозможность поднять нагрузку выше  $\sim 116,7$  кг/с (420 т/ч) при работе на природном газе) были проведены тепло-гидравлические расчеты по программам TRAKT, Гидравлика<sup>6</sup>, Boiler Designer<sup>7,8</sup>.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ (КОТЛОАГРЕГАТА)

Опытно-промышленные котлы типа Е-500-140 ГМВН (ТГМЕ-444) с естественной циркуляцией с вихревой топкой Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) выполнены из газоплотных панелей и предназначены для работы под наддувом. Котлы работают в блоке с теплофикационными турбинами типа ПТ 80/100-130 ЛМЗ или Т-110/120 УТМЗ. Они имеют трехходовую компоновку поверхностей нагрева с размерами в плане по осям колон 17,0x13,75 м. Отметка балки верхнего пе-

рекрытия – 22,700 м, наивысшая отметка – 23,924 м.

Котлоагрегат состоит из топочной камеры, горизонтального газохода, опускного и подъемного конвективных газоходов (рис. 1).

В топочной камере, образованной испарительными экранами, размещен ширмовый пароперегреватель, расположенный в камере охлаждения у заднего экрана. В опускном газоходе и в средней части подъемного газохода расположены ширмоконвективные элементы пароперегревателя. В верхней части подъемного газохода находятся два пакета водяного экономайзера.

Подъемный конвективный газоход двумя газоходами соединен с регенеративным вращающимся воздухоподогревателем РВП-88, установленным вне здания котельной с фронта котла.

Основные расчетные характеристики приведены в табл. 1 и 2.

Учитывая весьма оригинальную и новую конструкцию малогабаритного котла разработки ЦКТИ, характеристики особенностей рассмотрены несколько более подробно, чем это обычно принято.

**Топочная камера** состоит из горизонтальной цилиндрической вихревой камеры горения и призматической камеры охлаждения. Диаметр (условный) камеры горения и глубина камеры по осям труб – 3,920 м, ширина топочной камеры по осям – 13,658 м. Два двухсветных экрана, расположенные параллельно боковым стенам, делят топочную камеру по всей высоте на три отсека, соединенные в нижней части между собой лазами в экранах. Все экраны топки выполняются в виде газоплотных цельносварных панелей из плавниковых труб.

<sup>6</sup>Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 5251 / А.Б. Баранников, А.А. Белов, В.С. Федоров. Правообладатель Московский государственный университет леса.

<sup>7</sup>Носков А.И. Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе TRAKT». Подольск: ЗИО, 1984. 40 с.

<sup>8</sup>Доверман Г.И. Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе BOILER DESIGNER». М.: OPTSIM-K, 2004. 215 с.

<sup>9</sup>На основании письма № 19/4105 от 23.11.99 г. Таганрогского котельного завода-изготовителя «Красный котельщик» максимально допустимая нагрузка по условиям надежности температурного режима зигов составляет 420 т/ч.

В районе задней стены камеры охлаждения расположено 12 вертикальных ширм пароперегревателя из плавниковых труб. Лобовая трубка каждой ширмы защищена от излучения факела трубой, включенной в задний экран топки.

На фронтовой стене камеры горения под углом 12° к горизонтали расположено шесть прямоточных газомазутных горелок (по две горелки в каждом отсеке топочной камеры).

Экраны топки состоят из 20 блоков: 6 блоков фронтового экрана, 6 блоков заднего экрана, 4 блоков боковых экранов и 4 блоков двухсветных экранов. Все экраны включены в контуры естественной циркуляции.

С целью уменьшения влияния неравномерности обогрева на надежность циркуляции блоки двухсветных и боковых экранов секционированы.

Парогенератор имеет двухступенчатую схему испарения. Пароводяная смесь первой ступени испарения из фронтового, заднего, двухсветных и примыкающих к фронту секций боковых экранов поступает во внутрибарабанные циклоны. Во вторую ступень испарения включены блоки (секции) боковых экранов, примыкающих к задней стенке топки и четырех выносных циклонов, расположенных попарно у боковых стен топочной камеры.

**Пароперегреватель.** В состав пароперегревателя входят ограждающие экраны горизонтального, опускного и подъемного газоходов, топочные ширмы и ширмоконвективные элементы опускного и подъемного газоходов. Экраны горизонтального, опускного и подъемного газоходов выполнены из плавниковых труб. Ширмоконвективный пароперегреватель (ШКПП) состоит из двух частей. Пароперегреватель

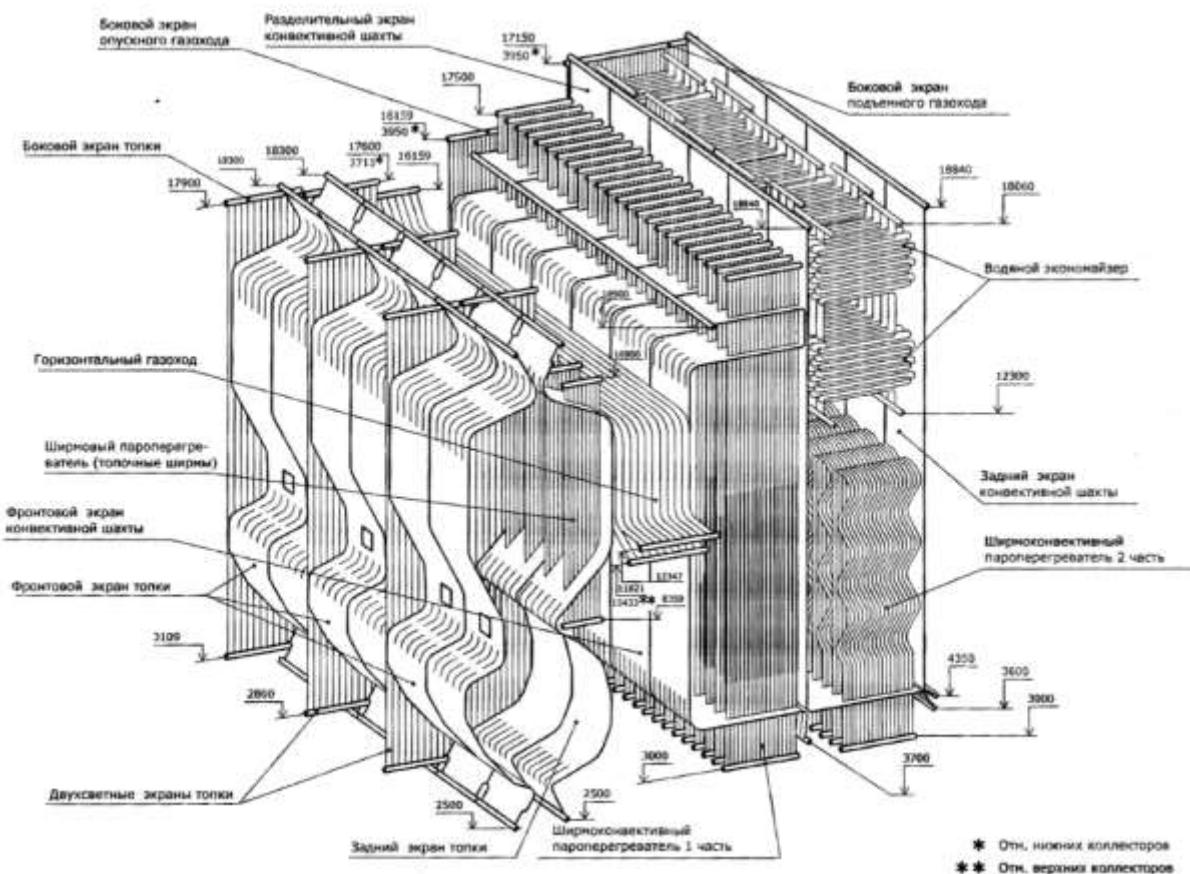


Рис. 1. Компоновочная схема котла ТГМЕ-444  
Fig. 1. TGME-444 boiler layout



Таблица 1  
Конструктивные (расчетные) характеристики котла

Table 1

*Boiler design characteristics*

Производительность котла, кг/с (т/ч)	138,9 (500 <sup>9</sup> )
Давление в барабане, МПа (бар)	15,5 (155)
Давление перегретого пара, МПа (бар)	14,0 (140)
Температура перегретого пара, °С	560
Топливо	мазут, природный газ
Лучевоспринимающая поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	
а) камеры горения	264
б) камеры охлаждения	545
в т.ч. ширмы	140
Поверхности нагрева:	963
горизонтального подъемного и опускного газоходов, м <sup>2</sup>	
ширмоконвективного пароперегревателя:	
а) 1 часть	1503
б) 2 часть	1112
водяного экономайзера, м <sup>2</sup>	2515
регенеративного воздухоподогревателя, м <sup>2</sup>	
а) горячей части	44636
б) холодной части	10978
Давление газа в верхней части топки котла, Па (мм вод. ст.)	3924 (400)

Таблица 2  
Расчетные показатели работы котла

Table 2

*Boiler estimated performances*

Параметры	Мазут	Газ
Температура питательной воды, °С	230	230
КПД парогенератора, %	94,63	95,37
Температура холодного воздуха, °С	70	30
Температура уходящих газов, °С	131	112
Избыток воздуха, α	1,03	1,05
Расход топлива, кг/с (кг/ч),	9,44 (34000)	10,22 (36800)
Температура горячего воздуха, °С	353	336
Температура газов на выходе из топки, °С	1348	1377

опускного газохода выполнен из ширмоконвективных элементов, представляющих собой сочетание ширм и зигзагов, 12 рядов зигзагов располагаются в промежутках между ширмами. В верхней части зигзаги имеют прямые (ширмовые) участки высотой 4,5 м от потолка.

В пароперегревателе подъемного газохода ширмы непосредственно переходят в зигзаги без промежуточных коллекторов. Ширмовая часть выполнена из плав-

никовых труб, зигзаги гладкотрубные.

**Регулирование температуры пара.** Для регулирования температуры пара на котле установлены последовательно три впрыскивающих пароохладителя. В качестве охлаждающей среды используется собственный конденсат.

Первый впрыск расположен перед топочными ширмами и служит для защиты труб топочного ширмового пароперегревателя.

Второй впрыск расположен за топочными ширмами (перед ширмами опускного газохода) и служит для защиты труб ширмоконвективного пароперегревателя опускного газохода.

Третий впрыск располагается перед ширмоконвективным пароперегревателем подъемного газохода и служит для регулирования температуры перегретого пара на выходе из котла при переменных режимах работы.

Суммарный расход воды на впрыски на номинальной нагрузке составляет около  $\sim 27,8$  кг/с 100 т/ч. Большая величина впрысков обусловлена расширением предела регулирования с поддержанием номинальной температуры пара за котлом в диапазоне 100–50% производительности котла. На всех впрыскивающих линиях установлены измерительные диафрагмы.

**Водяной экономайзер** располагается в верхней части подъемного газохода. Он состоит из двух пакетов двухзаходных змеевиков в каждом пакете. Расположение труб – шахматное. Экономайзер расположен перпендикулярно фронту котла, движение воды – подъемное.

**Конденсационная установка.** Для получения собственного конденсата на котле установлены две конденсационные установки (по одной на каждой стороне котла). Конденсационные установки расположены на потолочном перекрытии котла над конвективной шахтой и состоят из 6-ти конденсаторов и двух конденсатосборников.

Конденсация насыщенного пара, поступающего из барабана котла, производится путем охлаждения его питательной водой.

**Барабан и сепарационное устройство.** Барабан изготовлен из стали 16ГНМА. Внутренний диаметр барабана – 1600 мм, толщина стенки – 115 мм, длина барабана – 19900 мм.

Пароводяная смесь из экранов поступает в 52 внутрибарабанных циклона. Промывка пара осуществляется в слое питательной воды, поддерживаемом на дырчатом листе. Пар проходит через отверстия диаметром 5 мм в дырчатом листе и бар-

ботирует через слой питательной воды, освобождаясь от имеющихся в нем солей. Слой воды поддерживается постоянным, излишки стекают через сливные короба. На промывку пара поступает половина расхода питательной воды, остальная часть подается в нижнюю часть барабана. Для сепарации влаги, уносимой с паром при промывке, установлены потолочные жалюзи.

Основные проектные решения, заложенные в конструкцию котла, должны были обеспечить надежную работу поверхностей нагрева и высокие экономические показатели при сжигании мазута.

Снижение температуры продуктов сгорания до заданного значения на выходе из топки достигается увеличением лучистой поверхности топки за счет установки двусветных экранов и топочных пароперегревательных ширм. Применение новых элементов – ширмоконвективных пароперегревателей в опускном и подъемном газоходах обеспечило необходимый перегрев пара при приемлемых расходах на впрыски при сжигании мазута [9, 12, 13].

### 3. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

С 1973 по 1993 г. котлы работали исключительно на мазуте, а с 1993 г. и по настоящее время – только на природном газе. Длительный опыт эксплуатации котлов при сжигании газа показал, что по условиям надежности температурного режима ширмоконвективного пароперегревателя опускного газохода котлы не могут работать с нагрузками более  $\sim 116,7$  кг/с (420 т/ч) [9].

Проблемы с надежностью пароперегревателей при работе на природном газе начали выявляться после  $\sim 50000$  ч работы в 1988 г. – стали происходить разрывы труб зигов ширмоконвективного пароперегревателя опускного газохода. По результатам исследований ОАО ТКЗ «Красный котельщик» было выявлено, что основной причиной утонения стенок труб является интенсивная наружная коррозия металла, происходящая при наружной температуре стенки около  $600^{\circ}\text{C}$ , что значительно выше пре-



дельно допустимого значения по жаростойкости стали 12Х1МФ. Превышение температуры начинается при нагрузках котла более  $\sim 116,7$  кг/с (420 т/ч).

#### 4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления причин снижения показателей работы котла при сжигании природного газа на кафедре парогенераторостроения Южно-Российского государственного политехнического университета были проведены обширные расчетные исследования котла при сжигании мазута и природного газа, которые включали тепловые и гидравлические расчеты поверхностей нагрева<sup>6,7</sup> [9, 21–24].

Основные результаты расчетов приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что тепловосприятие экранов топки при сжигании мазута значительно больше, чем при сжигании газа. Обусловлено это большей степенью черноты факела, что, соответственно, приводит к уменьшению температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Расходы на впрыски при сжигании природного газа в  $\sim 10$  раз больше, чем при сжигании мазута.

Причины повышенных впрысков при сжигании природного газа обусловлены

принятыми в проекте решениями по составу поверхностей нагрева котла. Как это принято в практике проектирования газомазутных котлов, основные технические решения по тепловой схеме котла (схема сжигания, состав поверхностей нагрева, зоны их размещения в потоке продуктов сгорания и включение по рабочему телу) принимаются по наиболее тяжелому топливу – мазуту.

Малые габариты топочной камеры предопределили установку в ней двух двусветных экранов для обеспечения заданной температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Обычно в котлах высокого и сверхвысокого давления появляется необходимость в размещении на стенах топки настенного радиационного пароперегревателя, однако в котле ТГМЕ-444 это оказалось невозможным из-за малой поверхности стен топки, поэтому радиационный пароперегреватель выполнен в виде ширм площадью  $140,5$  м<sup>2</sup>, включенных в объем топки. Малое тепловосприятие радиационного пароперегревателя потребовало развитых поверхностей конвективных пароперегревателей в опускном и подъемном газоходах (ширмоконвективных пароперегревателей).

Таблица 3

*Основные результаты расчетов для существующей (проектной) схемы котла*

*Table 3*

*Main calculation results for existing (design) boiler circuit*

Величина	Топливо	
	мазут	газ
Паропроизводительность, кг/с (т/ч)	139 (500)	139 (500)
Температура перегретого пара, °С	560	560
Давление перегретого пара за котлом, МПа	13,7	13,7
Адиабатическая температура горения, °С	2280	2028
Температура газов на выходе из топки, °С	1261	1355
Тепловосприятие топки, Дж/кг (ккал/кг)	20500 (4896)	13775 (3290)
Тепловосприятие экономайзера, Дж/кг (ккал/кг)	5736 (1370)	4551 (1087)
Суммарный расход собственного конденсата на впрыск, кг/с (т/ч)	4,0 (14,4)	41,2 (148,4)

В силу повышенного излучения факела при сжигании мазута генерация пара в парообразующих экранах<sup>10</sup>  $D_{\text{в}}^{\text{м}}$  близка к номинальной паропроизводительности  $D$ . Поэтому на впрыск может быть использован расход, равный  $d_{\text{k}}^{\text{м}} = D - D_{\text{в}}^{\text{м}}$ .

При сжигании природного газа происходит перераспределение тепловосприятий между поверхностями топки и конвективной шахты. Из-за малой светимости факела тепловосприятие парообразующих экранов падает (и, следовательно, падает генерация пара в них  $D_{\text{в}}^{\text{г}}$ ), а в конвективных поверхностях нагрева ШКПП опускного и подъемного газоходов и экономайзеров) растет. Это вызывает значительный рост приращения энталпии в пароперегревателе и расходов на впрыски.

Расход генерируемого пара в водосодержащих поверхностях нагрева  $D_{\text{в}}$  определяется тепловосприятиями парообразующих экранов топки  $Q_{\text{л}}^{\text{в}}$  и экономайзера  $Q_{\text{k}}^{\text{в}}$ :

$$D_{\text{в}} = \frac{(Q_{\text{k}}^{\text{в}} + Q_{\text{л}}^{\text{в}})B_p}{(i'' - i_{\text{пв}})}.$$

Если учесть, что при переходе на сжигание газа  $Q_{\text{л}}^{\text{в}}$  уменьшается в значительно большей степени, чем увеличивается тепловосприятие экономайзера  $Q_{\text{k}}^{\text{в}}$ , то количество генерируемого в водосодержащих поверхностях пара  $D_{\text{в}}$  уменьшается, что приводит к росту расходов на впрыски. Пароперегреватель в этом случае должен не только перегревать пар, но и работать как парогенерирующая поверхность.

Чтобы снизить тепловосприятие пароперегревателя при сжигании природного газа, необходимо уменьшить пароперегревательные поверхности нагрева и одновременно увеличить тепловосприятие во-

досодержащих поверхностей.

Рассмотрим возможные направления решения поставленных задач.

## 5. НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

В паровом котле происходят процессы подогрева воды, превращения ее в пар и перегрева пара до заданной температуры. Теплоту, необходимую для подогрева и парообразования  $Q_{\text{в}}^{\text{потр}}$  и перегрев пара  $Q_{\text{пв}}^{\text{потр}}$ , выразим с учетом расхода конденсата на впрыск  $d_{\text{k}}$  следующим образом [10]:

$$Q_{\text{в}}^{\text{потр}} = D(i'' - i_{\text{пв}}) - d_{\text{k}} \cdot r;$$

$$Q_{\text{пв}}^{\text{потр}} = D(i_{\text{пв}} - i'') + d_{\text{k}} \cdot r.$$

Действительные тепловосприятия водосодержащих и пароперегревательных поверхностей нагрева в существующем котле определяются величинами их площадей и плотностями тепловых потоков:

$$Q_{\text{в}}^{\text{д}} = Q_{\text{л}}^{\text{в}} + Q_{\text{k}}^{\text{в}}; \quad Q_{\text{пв}}^{\text{д}} = Q_{\text{л}}^{\text{пв}} + Q_{\text{k}}^{\text{пв}},$$

где  $Q_{\text{л}}^{\text{в}} = \bar{q}_{\text{л}}^{\text{в}} \cdot H_{\text{л}}^{\text{в}}$ ;  $Q_{\text{k}}^{\text{в}} = \bar{q}_{\text{k}}^{\text{в}} \cdot H_{\text{k}}^{\text{в}}$ ;  $Q_{\text{л}}^{\text{пв}} = \bar{q}_{\text{л}}^{\text{пв}} \cdot H_{\text{л}}^{\text{пв}}$ ;  $Q_{\text{k}}^{\text{пв}} = \bar{q}_{\text{k}}^{\text{пв}} \cdot H_{\text{k}}^{\text{пв}}$  – радиационные и конвективные составляющие тепловосприятий водосодержащих и пароперегревательных поверхностей нагрева;  $\bar{q}_{\text{л}}^{\text{в}}$ ,  $\bar{q}_{\text{k}}^{\text{в}}$  – средние плотности тепловых потоков на радиационных и конвективных водосодержащих и пароперегревательных поверхностях нагрева;  $H_{\text{л}}^{\text{в}}$ ,  $H_{\text{k}}^{\text{пв}}$  – площади радиационных и конвективных водосодержащих и пароперегревательных поверхностей нагрева.

При проектировании необходимо выдерживать соответствие потребной  $Q_{\text{в}}^{\text{потр}}$ ,  $Q_{\text{пв}}^{\text{потр}}$  и действительной  $Q_{\text{в}}^{\text{д}}$ ,  $Q_{\text{пв}}^{\text{д}}$  теплот

<sup>10</sup>Здесь и далее обозначения соответствуют [9].



на водосодержащих и пароперегревательных поверхностях нагрева.

Как видно из приведенных зависимостей, изменить  $Q_{\text{в}}^{\text{потр}}$  и  $Q_{\text{пе}}^{\text{потр}}$  можно, влияя на величину расходов на впрыски  $d_k$ , а на действительные тепловосприятия  $Q_{\text{в}}^{\text{д}}$  и  $Q_{\text{пе}}^{\text{д}}$  – изменением их поверхностей нагрева в топке и конвективных газоходах ( $H_{\text{л}}^{\text{в}}$ ,  $H_{\text{к}}^{\text{в}}$ ,  $H_{\text{л}}^{\text{пе}}$ ,  $H_{\text{к}}^{\text{пе}}$ ) и зон их расположения (влияя на средние плотности тепловых потоков  $q_{\text{л}}^{\text{в}}$ ,  $q_{\text{к}}^{\text{пе}}$ ).

Применительно к условиям решаемой задачи, когда изменение тепловой схемы котла не должно вызывать значительных капитальных затрат, геометрические размеры топки должны оставаться без изменения. Но состав поверхностей нагрева в топке (парообразующие экраны и пароперегревательные ширмы) может быть изменен в пределах существующей лучистой поверхности топки, поэтому влияя на действительные тепловосприятия  $Q_{\text{к}}^{\text{д}}$ ,  $Q_{\text{пе}}^{\text{д}}$  можно, изменения только площади экономайзера и ШКПП, оставляя без изменения структуру радиационных поверхностей топки (первое направление изменения тепловой схемы), или изменять поверхности водосодержащих и пароперегревательных поверхностей как в топке, так и в конвективных газоходах (второе направление изменения тепловой схемы котла).

В существующем паровом котле, где впрыски доходят до 30% от номинальной паропроизводительности, теплота, отданная продуктами сгорания в конвективных пароперегревателях  $Q_{\text{ке}}^{\text{пе}}$  существенно больше теплоты, воспринятой экономайзером  $Q_{\text{к}}^{\text{в}}$ . Уменьшить расходы на впрыски, например, до 10%  $D_{\text{ном}}$  можно снижением тепловосприятия конвективного пароперегревателя с 13009 Дж/кг (3107 ккал/кг) до 10409 Дж/кг (2486 ккал/кг). Для обеспечения таких показателей потребуются соответствующие изменения поверхностей ШКПП и экономайзера.

Практическую реализацию изменений тепловой схемы котла по указанным направлениям целесообразно проводить с учетом реальных возможностей изменения величин площадей поверхностей нагрева

как в конвективных газоходах, так и в топочной камере. Поэтому было рассмотрено несколько вариантов тепловых схем, сформированных с учетом возможностей их исполнения в существующих габаритах топки и конвективных газоходов котла и затратами на выполнение модернизации.

В качестве базового варианта рассмотрена исходная тепловая схема существующего котла по проекту ЦКТИ.

## 6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вариант 1 предусматривает отсутствие в подъемном газоходе ШКПП. При этом температура перед экономайзером увеличивается, что вызывает рост его тепловосприятия и, следовательно, увеличение генерации пара в водосодержащих поверхностях нагрева и снижение расхода на впрыски. В варианте 2 вместо ШКПП подъемного газохода устанавливается еще одна ступень экономайзера площадью 1000 м<sup>2</sup>, что приводит к дальнейшему снижению расходов на впрыски.

Характерной особенностью варианта 3 является то, что в отличии от исходного варианта, в нем из пароперегревательного тракта исключаются топочные ширмы. Они включаются в отдельный парообразующий циркуляционный контур. Вариант 4 подразумевает одновременно установку парообразующей топочной ширмы и ликвидацию ШКПП подъемного газохода. Установка парообразующей ширмы в топочной камере и замена ШКПП на дополнительную ступень экономайзера (вариант 5), как показали расчеты, приводит к избыточной генерации пара, сопровождаемой нулевым расходом на впрыски.

Включение в отдельный контур циркуляции ширмовых элементов опускного газохода (вариант 6) также снижает расходы на впрыски по сравнению с базовым. Дальнейшее увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева в варианте 7 за счет замены ШКПП на дополнительную ступень экономайзера приводит к невозможности обеспечения за-

данного значения температуры перегретого пара на номинальной нагрузке.

Результаты расчетов вариантов тепловых схем представлены в табл. 4.

Увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева и снижение расходов на впрыски приводят к уменьшению паросодержания на выходе из экономайзера, и в схемах с парообразующими ширмами возможен недогрев воды на его выходе, что увеличивает устойчивость работы экономайзера.

Однако с уменьшением расходов на впрыски наблюдается снижение диапазона регулируемых нагрузок котла вплоть до нуля (в вариантах 5 и 7). Расширить диапазон регулируемой нагрузки котла можно введением рециркуляции продуктов сгорания. Таким образом, если подать в топку газы рециркуляции в количестве 15%, то наименьшая регулируемая нагрузка в варианте 3 снизится до 270 т/ч, т.е. составит 54% от  $D_{\text{ном}}$ .

Следовательно, для существующего режима работы парового котла ТГМЕ-444 с единственным топливом – природным газом – существует возможность улучшения

его эксплуатационных показателей путем изменения тепловой схемы.

Следует отметить малую чувствительность к изменению тепловых схем температуры уходящих газов и горячего воздуха. Вероятно, это свойство принятой компоновки котла.

Наряду с необходимостью улучшения тепловой схемы парового котла, следует отметить назревшую необходимость пересмотра и его воздушного тракта. За 40 лет работы котла с воздухоподогревателями типа РВП-88 перетоки холодного воздуха всегда находились на высоком уровне [8, 9]. В последние годы их величина фиксировалась на уровне около 60%. Неоднократно предпринимавшиеся попытки снизить перетоки результатов не дали, поэтому в рамках исследования был рассмотрен вариант замены регенеративного воздухоподогревателя на трубчатый. Были выполнены вариантовые тепловые расчеты котла. Рассматривались трубчатые воздухоподогреватели (ТВП) с трубами Ø51x1,5, Ø40x1,5 и Ø29x1,5 мм и различными значениями поверхности нагрева. В расчетах учитывалось, что при сжигании природного

**Результаты вариантовых расчетов тепловых схем**

**Calculation results of thermal circuit variants**

**Таблица 4**

**Table 4**

Вариант	Паропроизводительность, кг/с (т/ч)	Температура перегретого пара, °С	Температура уходящих газов, °С	Температура горячего воздуха, °С	Суммарный расход на впрыск, кг/с (т/ч)	Минимальная регулируемая нагрузка, кг/с (т/ч)	Массовое паросодержание на выходе из экономайзера, %
Базовый	139 (500)	560	108	330	41,2 (148,4)	52,8 (190)	12,9
1	139 (500)	560	107	329	25,2 (90,8)	56,9 (205)	7,5
2	139 (500)	560	103	310	23,5 (84,7)	59,7 (215)	8,9
3	139 (500)	560	103	311	19,2 (69,1)	94,4 (340)	-12,4
4	139 (500)	560	104	314	4,1 (14,9)	118,1 (425)	-11,2
5	139 (500)	558	94	275	0 (0)	0 (0)	-1,7
6	139 (500)	560	101	303	11,9 (39,5)	97,2 (350)	-27,4
7	139 (500)	549	102	307	0 (0)	0 (0)	-24,4



газа температура горячего воздуха в соответствии с<sup>11</sup> должна быть на уровне 230°C, причем это значение не является фиксированным, а должно определяться термоэкономическим расчетом. Присосы холодного воздуха принимались равными 3%. В качестве основного ограничивающего фактора при выборе конструкции ТВП принята масса на уровне существующего РВП. Расчет варианта ТВП с трубами Ø40x1,5 мм показал, что при этом температура горячего воздуха снижается до 225°C, температура газов на выходе из топки снижается на 12°C, КПД котла брутто увеличивается на 2% вследствие снижения потерь тепла с уходящими газами.

Дальнейшее повышение показателей эффективности возможно только с учетом работы паросилового блока в целом. Могут быть рассмотрены варианты, при реализации которых возможно снижение температуры уходящих газов за счет установки турбинного экономайзера (ТЭК). В этом случае тепловая мощность парового котла складывается из двух составляющих:

$$Q_{\text{ПК}} = Q_{\text{ПК}}^{\text{ВД}} + Q_{\text{ПК}}^{\text{ТЭК}},$$

где  $Q_{\text{ПК}}^{\text{ВД}} = Q_{\text{в}}^{\text{потр}} + Q_{\text{пе}}^{\text{потр}}$  – тепловосприятие пароводяного тракта котла;  $Q_{\text{ПК}}^{\text{ТЭК}}$  – тепловосприятие турбинного экономайзера.

Включение в схему котла ТЭК может рассматриваться в двух вариантах:

1) тепловосприятие пароводяного тракта котла остается неизменным и введение ТЭК приводит к более глубокой утилизации тепла уходящих газов. При рассмотрении данного варианта необходимо учитывать не только повышение КПД котла за счет снижения температуры уходящих газов, но и увеличение выработки электроэнергии за счет уменьшения отбора пара из цилиндра высокого давления, а также снижение эффективности цикла в целом за счет увеличения расхода рабочего тела через конденсатор;

2) тепловосприятие пароводяного

тракта котла уменьшается, а тепловосприятие турбинного экономайзера увеличивается. Таким образом, возможен поиск оптимального соотношения  $Q_{\text{ПК}}^{\text{ВД}}$  и  $Q_{\text{ПК}}^{\text{ТЭК}}$  по критерию максимальной эффективности работы блока в целом;

3) тепловая мощность котла увеличивается до допустимых с точки зрения надежности работы экранов топки и температурного режима наиболее напряженных пароперегревательных поверхностей нагрева. В этом случае в турбинный экономайзер направляется часть потока питательной воды, и он работает параллельно с группой подогревателей высокого давления.

Дополнительный положительный эффект может дать установка теплообменника, в котором подогревается вода для тепловой сети (теплофикационный экономайзер). В этом случае можно добиться более глубокого охлаждения уходящих газов, вплоть до температуры, близкой к температуре точки росы. Эффективность возможных вариантов должна также оцениваться с учетом экономических показателей работы станции в целом.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы и рекомендации по изменению тепловой схемы котла.

1. Изменением конструкции и тепловосприятия пароперегревательных поверхностей нагрева котла можно добиться значительного снижения расходов на впрыски, снизить тепловую развертку и повысить надежность их работы с сохранением высокого уровня экономических показателей.

2. Наибольший эффект снижения расходов на впрыски достигается в случаях, когда пароперегревательные топочные ширмы заменяются на парообразующие с включением их в схему циркуляции котла.

3. Увеличение тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева за счет перевода пароперегревательных

<sup>11</sup>Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е. НПО ЦКТИ – ВТИ. СПб, 1998. 256 с.

ширм в топке в парообразующие приводит к увеличению недогрева воды на выходе из экономайзера, что повышает устойчивость его работы.

4. Снижение диапазона регулируемой нагрузки котла при увеличении тепловосприятия водосодержащих поверхностей нагрева (при снижении расхода на впрыски) можно компенсировать введением в топку газов рециркуляции, отбираемых после экономайзера.

5. Перспективным для дальнейшей проработки следует признать схемы котла с введением в конвективные газоходы теплофикационных или турбинных экономайзеров, а также поверхностей нагрева, охлаждаемых рабочей средой с пониженным уровнем давления. Целесообразность их применения должна определяться с учетом их влияния на экономические показатели работы ТЭЦ-2 в целом.

#### Библиографический список

1. Клер А.М., Потанина Ю.М., Епишкин Н.О. Оптимизация угольных энергоблоков на суперсверхкритические параметры пара по критериям максимума энергетической и экономической эффективности // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 28–29 октября 2014 г.). М.: Изд-во ВТИ, 2014. С. 100–106.
2. Жуков Е.Б., Меняев К.В., Таймасов Д.Р. Совместное сжигание кородревесных отходов и угля в малой и средней энергетике // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 2–3 октября 2018 г.). М.: Изд-во ВТИ, 2018. С. 174–179.
3. Голованов Н.В., Иванов В.А., Попов А.А. [и др.]. Новая конструкция парогенератора для газомазутных ТЭЦ // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 49–58.
4. Голованов Н.В., Митор В.В., Назаренко В.С. Итоги освоения и исследования головного малогабаритного парогенератора Е-500-140 ГМВН на Ростовской ТЭЦ-2 // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 59–73.
5. Голованов Н.В., Митор В.В. Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ // Труды ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1975. Вып. 132. С. 3–14.
6. Голованов Н.В. Малогабаритные парогенераторы с вихревой топкой ЦКТИ. Особенности конструкции и эксплуатации. Перспективы применения // Труды ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. Вып. 154. С. 3–13.
7. Ицковский М.А. Создание и освоение опытно-промышленных и серийных котлов с вихревыми топками // Труды ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. Вып. 155. С. 3–14.
8. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 2002. Вып. 159. С. 127–138.
9. Болдырев Г.И., Голубых А.К., Таск О.А., Гильде Е.Э. Итоги эксплуатации малогабаритных котлов Е-500-140 ГМВН на Ростовской ТЭЦ-2 // Теплоэнергетика. 1999. № 11. С. 14–19.
10. Паршин А.А., Митор В.В., Безгрешнов А.Н., Шлейфер Б.М., Петров В.В., Христич Л.М. Тепловые схемы котлов. М.: Машиностроение, 1987. 221 с.
11. Липов Ю. М., Третьяков Ю. М. Котельные установки и парогенераторы. М.–Ижевск: НИЦ «Регуляция и хаотическая динамика», 2003. 592 с.
12. Голованов Н.В., Попов А.А., Кухно А.А., Малютин М.Р., Барбелько И.В., Королевский Г.В. [и др.]. Наладка и исследование вихревой топки МПГ Е-500 ВН // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 3–16.
13. Чавчанидзе Е.К., Сергеев Н.В., Чураков М.А., Королевский Г.В., Рокачев Г.И., Сергиевский Н.В. Наладка и исследование радиационного пароперегревателя из цельносварных ширм МПГ Е-500 НВН // Освоение и исследование головных малогабаритных парогенераторов с вихревой топкой ЦКТИ: сб. статей / под ред. Н.В. Голованова, А.И. Кульчицкого. Л.: Изд-во ЦКТИ, 1978. С. 52–58.
14. Красинский Д.В., Рычков А.Д., Саломатов В.В. Математическое моделирование трехмерного турбулентного течения в вихревой топке парогенератора // Вычислительные технологии. 1995. Т. 4. № 12. С. 189–198.
15. Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. Milano: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 434 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://b-ok2.org/ireader/686861> (24.03.2019).
16. Ganapathy V. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators. Design, Applications, and Calculations. New York: Springer, 2011. 432 p.

- tions. New York: Marcel Dekker, 2003. 579 p.
17. Кали Б. Анализ возможностей совершенствования тепловой схемы и повышения эффективности работы энергоблока 110 МВт с котлоагрегатом ТГМЕ-464 // Энергетика, радиотехника, электроника и связь. Теплоэнергетика. Алматы: АУЭС, 2017. С. 20–25.
18. Mertens N., Alabaid F., Starkloff R., Epple B., Kim H.-G. Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up // Applied Energy. 2015. Vol. 144. P. 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.065>
19. Walter H., Linzer W., Schmid T. Dynamic flow instability of natural circulation heat recovery steam generators // Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena (Prague, 1 August 2005). Prague; 2005. P. 1–11.
20. Mertens N., Alabaid F., Lanz T., Epple B., Kim H.-G. Dynamic simulation of a triple-pressure combined-cycle plant: Hot start-up and shutdown // Fuel. 2016. Vol. 167. P. 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.055>
21. Безгрешнов А.Н., Белов А.А., Баранников А.Б., Озеров А.Н., Дьяконов Е.М. Исследование гидродинамики пароперегревательного тракта котла ТГМЕ-444 // Повышение эффективности производства электроэнергии: материалы IV Междунар. конф. (г. Новочеркасск, 14–17 октября 2003 г.). Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2003. С. 46–48.
22. Баранников А.Б., Дьяконов Е.М., Вершинин Л.Б., Безгрешнов А.Н., Озеров А.Н., Усиков Н.В. Исследование тепловой схемы котла ТГМЕ-444 Ростовской ТЭЦ-2 с целью повышения надежности его работы // Кибернетика электрических систем: материалы XXVI сессии Всерос. семинара «Диагностика энергооборудования»: в 2 ч. (г. Новочеркасск, 21–24 сентября 2004 г.). Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2004. Ч. 2. С. 51–55.
23. Безгрешнов А.Н., Вершинин А.Б., Дьяконов Е.М., Михалев Д.Л. Выбор тепловой мощности котла ТГМЕ-444 при его реконструкции // Повышение эффективности производства электроэнергии: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Новочеркасск, 14–17 октября 2003 г.). Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2005. С. 77–79.
24. Безгрешнов А.Н., Дьяконов Е.М., Павлова Л.А. Исследование возможности перевода котла ТГМЕ-444 РТЭЦ-2 на работу с вспрыском питательной воды // Известия вузов. Электромеханика. 2008. С. 195–196.

#### References

1. Kler AM, Potanina YuM, Epishkin NO. Coal power unit optimization for steam supercritical parameters according to the criteria of maximum energy and economic efficiency. In: *Ispol'zovanie tverdyh topliv dlya effektivnogo i ekologicheskogo chistogo proizvodstva elektroenergii i tepla: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* = Using solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electric energy and heat: Proceedings of II International scientific and technical conference. 28–29 October 2014, Moscow. Moscow: All-Russia Thermal Engineering Institute; 2014, p. 100–106. (In Russ.)
2. Zhukov EB, Menyaev KV, Tajmasov DR. Combined burning of bark and wood wastes and coal in small and medium-sized energy. In: *Ispol'zovanie tverdyh topliv dlya effektivnogo i ekologicheskogo chistogo proizvodstva elektroenergii i tepla: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* = Using solid fuels for efficient and environmentally friendly production of electric energy and heat: Proceedings of II International scientific and technical conference. 2–3 October 2018, Moscow. Moscow: All-Russia Thermal Engineering Institute; 2018, 174–179. (In Russ.)
3. Golovanov NV, Ivanov VA, Popov AA, et al. New design of a steam generator for gas-oil thermal power plants. In: Golovanov NV, Kul'chikij AI. (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vihrevoj topkoj* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 59–73. (In Russ.)
4. Golovanov NV, Mitor VV. Development and research of small-sized head steam generators with a vortex furnace of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. In: Golovanov NV, Kul'chikij AI (eds.). *Trudy CKTI* = Proceedings of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1975, issue 132, p. 3–14. (In Russ.)
5. Golovanov NV. Small-sized steam generators with a vortex furnace of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Design and operation features. Application prospects. In: Golovanov NV, Kul'chikij AI (eds.). *Trudy CKTI* = Proceedings of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, issue 154, p. 3–13. (In Russ.)
6. Golovanov NV. Small-sized steam generators with a vortex furnace of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Creation and development of pilot industrial and serial boilers with vortex furnaces. In: Golovanov NV, Kul'chikij AI (eds.). *Trudy CKTI* = Proceedings of Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 2002, issue 159, p. 127–138. (In Russ.)
7. Rokachev GI, Golubyh AK, Tass OA, Gil'de EE. Re-

- sults of E-500-140 GMVN small-sized boilers operation at Rostov CHP-2. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 1999;11:14–19. (In Russ.)
9. Bezgreshnov AN, Belov AA, Ozerov AN, Usikov NV, D'yakonov EM, Barannikov AB, et al. Selecting a retrofitting profile for the TGME-444 boiler at the Rostov TETs-2 cogeneration station. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2009;6:15–21. (In Russ.)
10. Parshin AA, Mitor VV, Bezgreshnov AN, Shleifer BM, Petrov VV, Hristich LM. *Boiler thermal diagrams*. Moscow: Mashinostroenie; 1987, 221 p. (In Russ.)
11. Lipov YuM, Tret'yakov YuM. *Boiler plants and steam generators*. Moscow–Izhevsk: Research Center 'Regular and chaotic dynamics'; 2003, 592 p. (In Russ.)
12. Golovanov NV, Popov AA, Kuhno AA, Malyutin MR, Barbot'ko IV, Korolevskij GV, et al. Adjustment and study of MPG E-500 VN vortex furnace. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vibrevoj topkoj* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 3–16. (In Russ.)
13. Chavchanidze EK, Sergeev NV, Churakov MA, Korolevskij GV, Rokachev GI, Sergievskij NV. Adjustment and research of MPG E-500 NVN all-welded screen radiation superheater. In: Golovanov NV, Kul'chickij AI (eds.). *Osvoenie i issledovanie golovnyh malogabaritnyh parogeneratorov s vibrevoj topkoj CKTI* = Implementation and research of small-sized main steam generators with a vortex furnace. Leningrad: Central Scientific Research Boiler-Turbine Institute; 1978, p. 52–58. (In Russ.)
14. Krasinskij DV, Rychkov AD, Salomatov VV. Mathematical modeling of three-dimensional turbulent flow in a steam generator vortex furnace. *Vychislitel'nye tekhnologii* = Computational Technologies. 1995;4(12):189–198. (In Russ.)
15. Annaratone D. Steam Generators. Description and Design. Milano: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2008, 434 p. Available from: <https://book2.org/ireader/686861> [Accessed 24th March 2019].
16. Ganapathy V. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators*. Design, Applications, and Calculations. New York: Marcel Dekker; 2003, 579 p.
17. Kali B. Analyzing possibilities to improve thermal circuit and increase operation efficiency of a 110 MW power unit with a TGME-464 boiler. In: *Energetika, radiotekhnika, elektronika i svyaz'*. *Teploenergetika* = Power Engineering, Radio Engineering, Electronics and Communications. Heat Power Engineering. Almaty: Almaty University of Power Engineering and Telecom-  
munications; 2017, p. 20–25.
18. Mertens N, Alabaid F, Starkloff R, Epple B, Kim H-G. Comparative investigation of drum-type and once-through heat recovery steam generator during start-up. *Applied Energy*. 2015;144:250–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.065>
19. Walter H, Linzer W, Schmid T. Dynamic flow instability of natural circulation heat recovery steam generators. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena*. 1 August 2005, Prague. Prague; 2005, p. 1–11.
20. Mertens N, Alabaid F, Lanz T, Epple B, Kim H-G. Dynamic simulation of a triple-pressure combined-cycle plant: Hot start-up and shutdown. *Fuel*. 2016;167:135–148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.055>
21. Bezgreshnov AN, Belov AA, Barannikov AB, Ozerov AN, D'yakonov EM. Studying hydrodynamics of TGME-444 boiler superheat path. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva elektroenergii: materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii* = Improving efficiency of electric energy production: Materials of IV International Conference. 14–17 October 2003, Novocherkassk. Novocherkassk: Platov South Russian State Polytechnic University; 2003, p. 46–48. (In Russ.)
22. Barannikov AB, D'yakonov EM, Vershinin LB, Bezgreshnov AN, Ozerov AN, Usikov NV. Studying thermal circuit of Rostov TPP-2 TGME-444 boiler in order to increase its operation reliability. In: *Kibernetika elektricheskikh sistem: materialy XXVI sessii Vseso Rossijskogo seminara "Diagnostika energooborudovaniya"* = Cybernetics of electrical systems: Materials of XXVI session of the All-Russian seminar "Diagnostics of power equipment". 21–24 September 2004, Novocherkassk. Novocherkassk: Platov South Russian State Polytechnic University; 2004, part. 2, p. 51–55. (In Russ.)
23. Bezgreshnov AN, Vershinin AB, D'yakonov EM, Mihalev DL. Choosing thermal power of TGME-444 boiler under its reconstruction. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva elektroenergii: materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii* = Improving efficiency of electric energy production: Materials of IV International scientific and technical conference. 14–17 October 2003, Novocherkassk. Novocherkassk: Platov South Russian State Polytechnic University; 2003, p. 77–79. (In Russ.)
24. Bezgreshnov AN, D'yakonov EM, Pavlova LA. Studying the possibility to switch Rostov CHP-2 TGME-444 boiler into feedwater injection operation. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* = Russian Electromechanics. 2008;195–196. (In Russ.)

### Критерии авторства

Усиков Н.В., Дьяконов Е.М. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за пла-  
гият.

### Authorship criteria

Usikov N.V., Dyakonov E.M. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.



**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Усиков Николай Васильевич,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры тепловых электрических станций  
и теплотехники,  
Южно-Российский государственный  
политехнический университет им. М.И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск,  
ул. Просвещения, 132, Россия;  
✉ e-mail: usikovnw@rambler.ru

**Дьяконов Евгений Михайлович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
и. о. заведующего кафедрой тепловых  
электрических станций и теплотехники,  
Южно-Российский государственный  
политехнический университет им. М.И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск,  
ул. Просвещения, 132, Россия;  
e-mail: deml@rambler.ru

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests  
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all  
the co-authors.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Nikolay V. Usikov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Thermal Power Stations and Heat Engineering,  
Platov South Russian State Polytechnic University,  
132, Prosveshcheniya St.,  
Novocherkassk 346428, Russia;  
✉ e-mail: usikovnw@rambler.ru

**Evgeniy M. Dyakonov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Acting Head of the Department of Thermal Power  
Stations and Heat Engineering,  
Platov South Russian State Polytechnic University,  
132, Prosveshcheniya St.,  
Novocherkassk 346428, Russia;  
e-mail: deml@rambler.ru