

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПАРОВОГО КОТЛА ЗМЕЕВИКОВОГО ТИПА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА СЕВЕРНОМ НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

М.М. Дудкин, К.В. Осинцев, С.И. Кускарбекова

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Транспортабельная котельная установка распространена в Северных регионах страны и имеет большой и стабильный спрос в самых разных сферах жизни. Применяемое оборудование и схемы существующих котельных установок устарели, требуют замены и модернизации. Новая установка включает в себя паровой котел змеевикового типа и вспомогательное оборудование, которое спроектировано с учетом выявленных недостатков. Змеевики парового котла представляют собой коаксиальные цилиндры. Область применения модернизированной транспортабельной котельной установки – нефтяное месторождение на Севере.

Работа направлена на изучение опытно-теоретического исследования работы парового котла змеевикового типа при реальных рабочих условиях. Приведены опытные данные работы котельной установки. Получены зависимости расхода топлива котельной установкой от температуры и давления теплоносителя. Собранные данные проанализированы с помощью статистического анализа. Сформулированы выводы и заложено перспективное направление для дальнейшего исследования и улучшения парового котла змеевикового типа. Предложены уравнения для расчета конвективной составляющей лучисто-конвективного теплообмена в газоходах с учетом конструктивной особенности котельного агрегата путем введения новых поправочных коэффициентов. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало их удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: котельная установка, змеевики, коаксиальные цилиндры, теплообмен, конвекция.

Актуальность

Транспортабельная котельная установка (ТКУ) распространена в Северных регионах страны и имеет спрос в самых разных сферах нашей жизни: в обслуживании частных домов в городах и небольших удаленных поселениях, в промышленности, в добыче нефти.

На буровых площадках, которые специализируются на добыче нефти, пар и горячая вода необходимы для технологических и собственных нужд обслуживающего персонала.

На территории нефтяных месторождений России часто встречаются блочно-модульные котельные (БМК) установки на базе котлов Е-1,0-0,9 М(3), которые работают на жидком топливе. Расход топлива при номинальном режиме составляет 0,28 кг/с. Рабочее давление теплоносителя на коллекторе составляет в среднем 0,4–0,45 МПа при температуре 143 °С (416 К).

В подобных котельных установках присутствует необходимое вспомогательное оборудование (система химводоочистки, питательные насосы, вентиляторы), которое требует ремонта, замены, модификации. Система химводоочистки (ХВО) не справляется с жесткой загрязненной водой, подвергая риску и увеличивая вероятность выхода из строя котлов по причине загрязнения труб и прогара.

Введение

Опытно-теоретическая работа подразумевает модернизацию ТКУ (МТКУ), а в частности, пол-

ную замену котлов [1]. Во время изучения вариантов для новой котельной на зарубежном рынке отмечены производители отопительного оборудования, работающего на жидком топливе, характеристики которого отвечают требованиям Заказчика: ACV, EnergyLogyc, Buderos Logano, Saturn, Ferolli, Viessmann, Kiturami и BABCOCK WANSON.

В качестве технико-эксплуатационных особенностей вышеперечисленные компании предлагают стальные агрегаты при малых габаритах, с полным автоматическим управлением, предоставляя возможность эксплуатировать агрегаты на разных комбинированных видах топлива за счет современных горелочных устройств собственного производства [2, 3]. Котлы предназначены для бытового и промышленного использования и отвечают требованиям стандартов относительно выбросов вредных веществ в атмосферу.

Современные котлы российского производства по своим характеристикам не уступают своим зарубежным аналогам.

Российские проектные организации постоянно совершенствуют конструкцию котлов, применяют новейшие технологии в проектировании и изготовлении. Несмотря на большую конкуренцию, отечественные котлы пользуются большим спросом как у крупных предприятий, так и у небольших потребителей, что обусловлено целым рядом объективных причин.

Во-первых, импортные устройства, отличаясь эргономичным дизайном, имеют высокую цену

монтажа и оборудования, вызванную тем, что все комплектующие таких котлов обязательно должны быть произведены тем же изготовителем. Более дешевые аналоги не всегда подходят по техническим характеристикам [4–6].

Во-вторых, импортные котлы не могут эффективно работать в условиях нестабильной подачи топлива и требуют очень высокого качества питательной воды, и, как результат, повышается стоимость всей установки.

Российские котлы обладают рядом других преимуществ, конкурентоспособны на отечественном рынке: низкая стоимость по сравнению с зарубежными аналогами; простота и удобство эксплуатации; проектирование и монтаж с учетом особенностей условий эксплуатации, в том числе климатических; соответствие российским нормативам и стандартам; высокая ремонтпригодность; надежность и возможность эксплуатации котлов дольше запланированных сроков; возможность изготовления и монтажа по специальным проектам; возможность устранения неполадок, выявленных в процессе эксплуатации, при участии завода-изготовителя [7, 8].

Паровые котлы змеевикового типа, которые заложены в проект МТКУ, на отечественном рынке Уральского региона представлены следующими производителями: ООО «Завод паровых установок UNISTEAM» г. Миасс, ООО «Уральский завод спецтехники» г. Челябинск.

Подача питательной воды для котла, а также топлива или газа происходит от источника Заказчика и осуществляется путем подсоединения через удобно расположенные разъемы. Производители также предлагают комбинированные горелки, работающие на природном газе и дизельном топливе.

Система автоматики и интуитивного управления парогенераторов UNISTEAM позволяет полностью контролировать процесс производства пара и вести учет расходов удаленно через мобильные гаджеты на платформе iOS и Android, через интернет-браузеры Safari, Google Chrome, Internet Explorer и может быть оснащена элементами дополненной реальности [9].

Российские производители проектируют и изготавливают оборудование, которое соответствует современным стандартам и требованиям потребителей, что повышает спрос. Наблюдается тенденция по улучшению автоматики и используемых материалов основных составляющих котлов. Производители уделяют больше внимания на используемое топливо, процесс горения и на экологические аспекты. Использование отечественных комплектующих в котлах облегчает замену и ремонт вышедших из строя запасных частей, что положительно влияет на производство российских парогенераторов, поскольку зарубежные аналоги комплектующих в разы дороже по цене и сроки поставки намного дольше.

В связи с перечисленными преимуществами и дальнейшими перспективами развития отечественного рынка по производству водотрубных змеевиковых и жаротрубных котлов выбран паровой котел змеевикового типа, произведенный на Урале [10, 11].

Постановка задачи

Для эксперимента сконструирована модернизированная транспортабельная котельная установка. Основное оборудование – паровые котлы змеевикового типа (рис. 1). Установка состоит из необходимого основного и вспомогательного теплово-

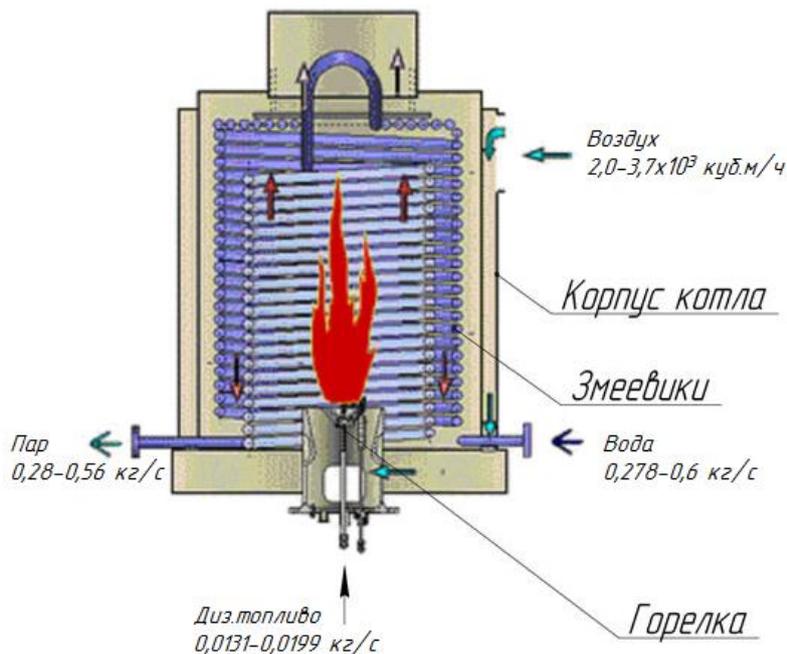


Рис. 1. Паровой котел змеевикового типа

го и электрического оборудования. МТКУ размещена в модульном контейнере морского типа и предназначена для работы в климатических условиях при низких температурах.

Эксперимент запланирован для сбора и изучения рабочих характеристик парового котла змеевикового типа в реальных условиях Крайнего Севера. Для реализации экспериментального исследования установка размещена на кустовой площадке месторождения Варь-Ёган на зимний отопительный сезон.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи: подача пара на буровую установку и вспомогательные блоки для обогрева оборудования и технологического процесса сбора основных данных работы парового котла; построение и анализ зависимостей температуры и давления пара от расхода топлива, от качественных и количественных параметров питательной воды для обоснования экономических и технических затрат, преимуществ и дальнейших перспектив в области научного исследования и проектирования котельных [12].

Научная новизна

Впервые предложена конструкция котельной установки, включающая паровые котлы змеевикового типа, отличающиеся повышенным коэффициентом теплоотдачи в конвективной части, состоящей из двух цилиндров коаксиальной формы (рис. 2), что позволяет турбулизовать поток дымовых газов, а также интенсифицировать теплообмен в кольцевом канале с переменным сечением, снижая температуру газов на выходе. Отличительная особенность котлоагрегата – это соотношения геометрических размеров котла: высоты топки H_T , диаметров коаксиальных цилиндров змеевиков D_1 и D_2 , которые определяются как $H_T = (2,00 \dots 2,10)D_1$, $H_T = (1,70 \dots 1,90)D_2$ [13, 14].



Рис. 2. Цилиндры коаксиальной формы, состоящие из спиральных змеевиков

Интенсификация теплообмена в котле достигнута путем использования змеевиков разного диаметра. Дымовые газы движутся по кольцевому каналу переменного сечения. С помощью такой компоновки увеличена общая поверхность теплообмена. Первый змеевик большего диаметра, что позволяет теплоносителю получить больше теплоты и ускорить процесс парообразования как за счет принятого количества теплоты, так и за счет сужения проходного сечения. Дополнительную площадь теплообмена составляет спиральный змеевик, установленный на потолочной части котла [15].

Измерения скорости дымовых газов проводились в лабораторных условиях с помощью экспериментального стенда. Аэродинамические характеристики вентилятора регулировались посредством частотного привода электродвигателя. Эксперимент проводился при различных диаметрах канала для дымовых газов, образованных змеевиками. Скорость дымовых газов вычислена по перепаду давлений, замеренных на входе и выходе канала дымовых газов [16]. По итогам эксперимента было выбрано оптимальное соотношение между аэродинамическим сопротивлением газозащитного тракта и максимальным значением скорости дымовых газов. Повышенная скорость дымовых газов и увеличенная площадь теплообмена повысили коэффициент теплоотдачи конвекцией, увеличив коэффициент теплопередачи (1).

$$K = \Psi(\alpha_k + \alpha_l), \quad (1)$$

где Ψ – коэффициент тепловой эффективности пучка;

α_k и α_l – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением в конвективной части соответственно.

Среднелогарифмический температурный напор встроенного воздухоподогревателя возрастает за счет разницы холодного ($T_{хв}$) и горячего ($T_{гв}$) воздуха. Кроме того, разность температур $\Delta T = T_{гв} - T_{хв}$ повышается за счет верхней подачи движения воздушного потока при использовании вентилятора по сравнению с нижней подачей без дополнительных затрат электроэнергии на привод вентилятора. При увеличении ΔT в 1,20 раза скорость потока воздуха на участке «вентилятор – котел» увеличивается в 1,22 раза, при тех же условиях затраты электроэнергии возрастают на 0,80–0,90 %. Термическое напряжение котла уменьшается из-за нагрева воздуха, проходящего через встроенный воздухоподогреватель [17, 18].

Практическая значимость

Разработанная МТКУ применяется на буровых нефтедобывающих площадках в условиях Крайнего Севера, обеспечивая паром для отопления и технологических нужд основные части буровой площадки: вышечно-лебедочный и насосный блоки и блок дополнительных емкостей.

МТКУ спроектирована на базе современных паровых котлов змеевикового типа и замещает паровые котлы Е-1,0-0,9 М(3)-Э. За счет интенсификации процесса теплообмена снижена металлоемкость, что соответственно повлияло на габаритные размеры котла. Компактное исполнение позволило установить котлы в вертикальном положении. Новый котел занимает меньше пространства в котельной установке, чем один котел марки «Е», что позволяет рядом установить шкафы автоматического управления. Котлы установлены на металлические подставки, из-за чего стало возможно размещение вспомогательного оборудования (горелочное устройство, нагревательные элементы, система трубопроводов) под котельным агрегатом.

Результаты режимно-наладочных испытаний

При режимно-наладочных испытаниях МТКУ эксплуатировалась при двух режимах для сравнения результатов. Принципиальная схема МТКУ представлена на рис. 3. Первый режим представляет собой работу одного котла (на рис. 3 условные обозначения 1 и 2) и питательных насосов (на рис. 3: 21, 22 и 17, 18) по очереди.

Режим № 1. Опытные значения работы котла 1 и 2, питательных насосов 17, 18 и 21, 22 соответственно отражены в табл. 1, 2 и рис. 4–6.

Коэффициент корреляции, показывающий зависимость между температурой пара и расходом топлива, для парового котла № 1 (рис. 4) составляет 0,948, что говорит о сильной взаимосвязи данных

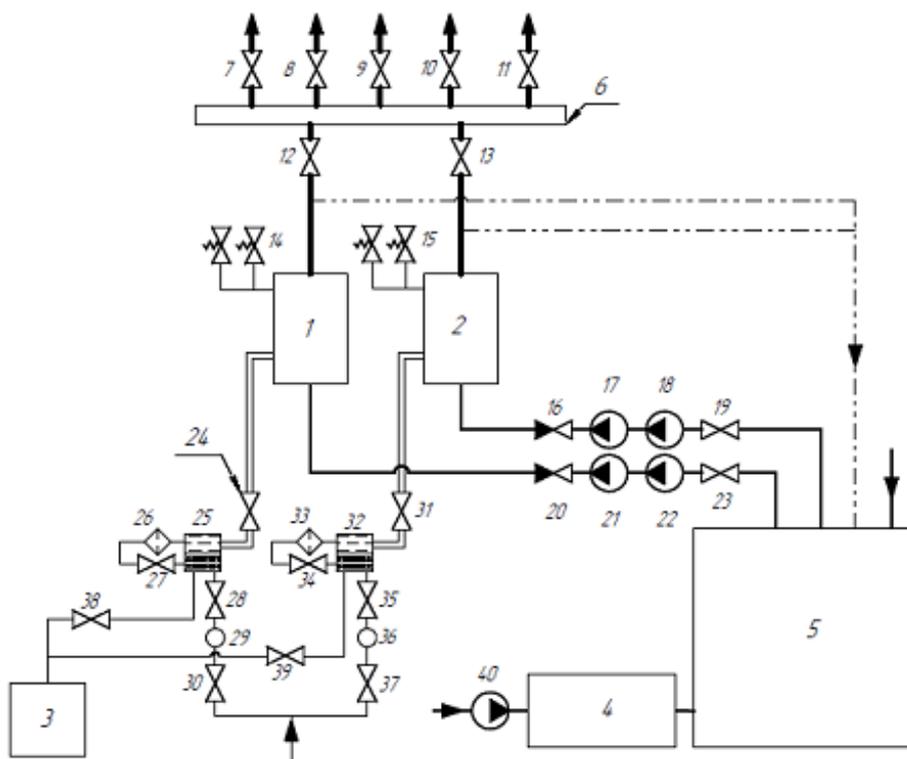


Рис. 3. Принципиальная схема МТКУ:

1, 2 – паровой котел; 3 – резервный бак топлива; 4 – блок химводоочистки; 5 – емкость питательная; 6 – распределительный коллектор; 7, 8, 9 – вентиль (пар потребителю); 10 – вентиль (пар на собственные нужды); 11 – вентиль (пар на обогрев емкости); 12, 13 – вентиль; 14, 15 – сбросной предохранительный клапан; 16, 20 – обратный клапан; 17, 18, 21, 22 – питательный насос; 19, 23, 24, 27, 28, 30, 31, 34, 35, 37–39 – вентиль; 25, 32 – разделитель; 26, 33 – фильтр тонкой очистки; 29, 36 – фильтр грубой очистки; 40 – насос

Таблица 1

Опытные значения работы парового котла № 1

Опыт	Замер	Расход воды, кг/с	Температура воды, °С	Расход топлива, кг/с	Температура пара после котла, °С	Давление пара после котла, МПа
1	1	0,30944	44	0,01526	151	0,36
	2	0,33167	44	0,01517	151	0,36
	3	0,33361	44	0,01431	149	0,35
	4	0,34917	46	0,01558	151	0,36

Опытные значения работы парового котла № 2

Опыт	Замер	Расход воды, кг/с	Температура воды, °С	Расход топлива, кг/с	Температура пара после котла, °С	Давление пара после котла, МПа
2	1	0,37444	31	0,01866	159	0,49
	2	0,42389	26	0,01900	160	0,50
	3	0,43167	32	0,01873	159	0,49
	4	0,45750	32	0,01883	159	0,49

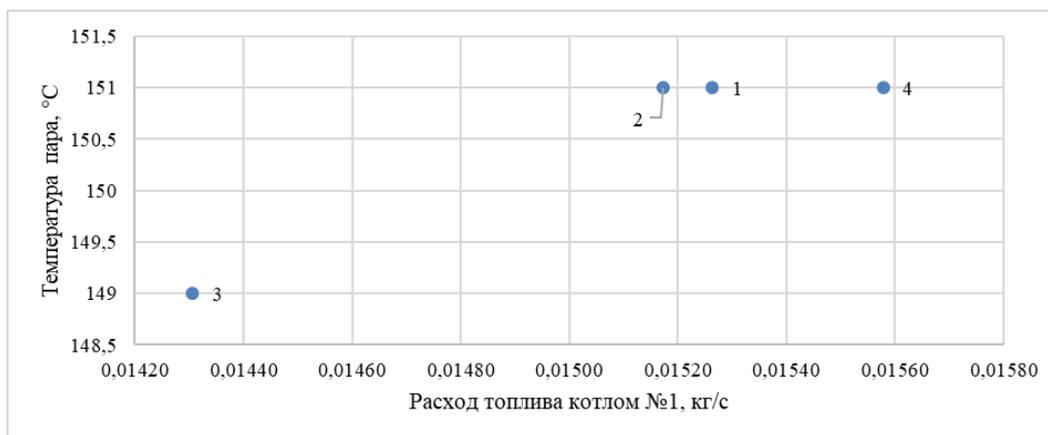


Рис. 4. Зависимость между температурой пара и расходом топлива на паровом котле № 1

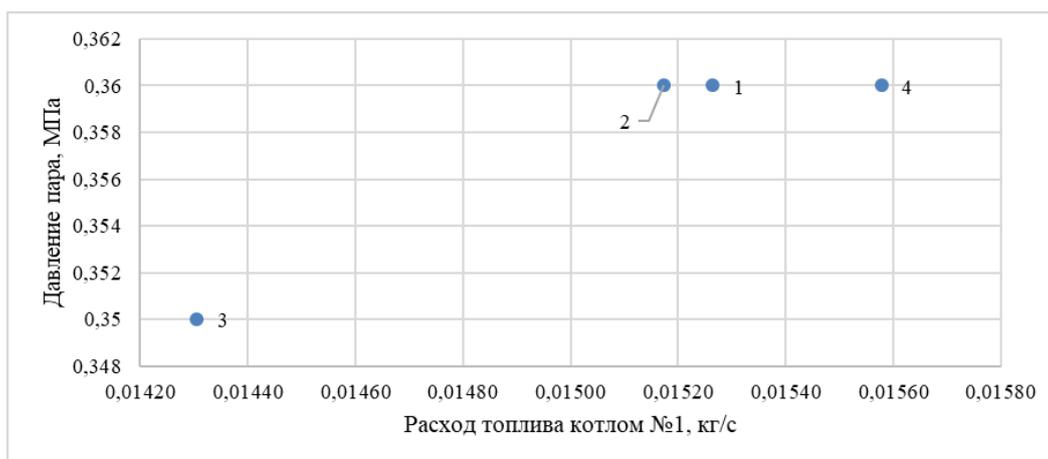


Рис. 5. Зависимость между давлением пара и расходом топлива на паровом котле № 1

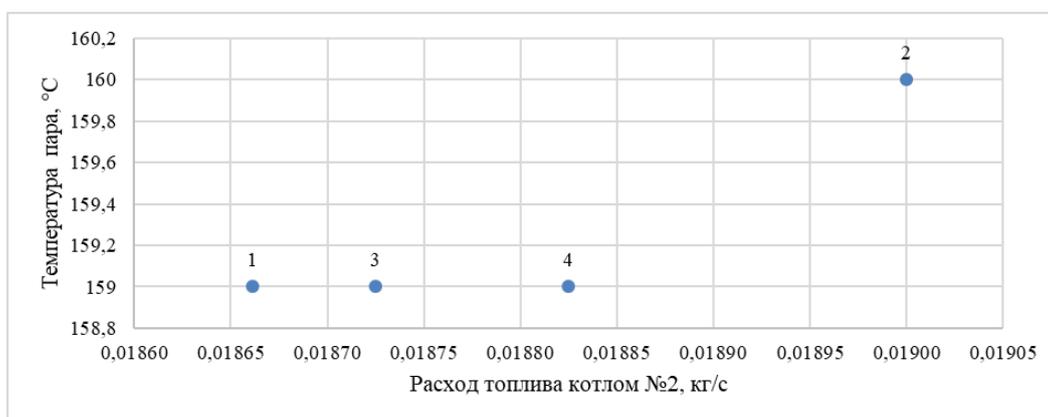


Рис. 6. Зависимость между температурой пара и расходом топлива на паровом котле № 2

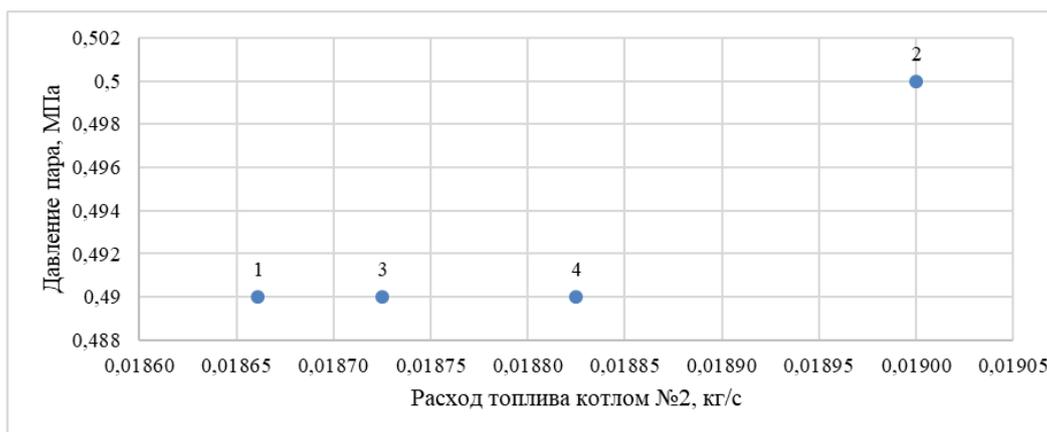


Рис. 7. Зависимость между давлением пара и расходом топлива на паровом котле № 2

величин. Положительная корреляция, близкая к единице, позволяет утверждать, что увеличение одной рассматриваемой величины оказывает влияние на рост второй [19].

Коэффициент корреляции, показывающий зависимость между давлением пара и расходом топлива котла № 1 (см. рис. 5), также составляет 0,948. Аналогичное вышепринятое заключение о зависимости между температурой пара и расходом топлива принято справедливым и для данных величин.

Коэффициент корреляции, показывающий зависимость между температурой пара и расходом топлива, для парового котла № 2 составляет 0,89, что говорит о достаточной взаимосвязи данных величин. Положительная корреляция указывает на то, что рост одной величины способствует увеличению второй.

Коэффициент корреляции, показывающий зависимость между давлением пара и расходом топлива котла № 2, также составляет 0,89. Вышепринятое заключение для рассматриваемой зависимости между температурой пара и расходом топлива принято и для данных параметров (рис. 7).

Режим № 2. Одновременная работа двух котлов с включением двух питательных насосов.

Для увеличения паропроизводительности включены оба котла и питательные насосы. Все

системы работали на полном режиме. В табл. 3 приведены результаты эксперимента.

На рис. 8 и 9 изображены зависимости между температурой, давлением пара и расходом топлива на первом котле соответственно.

Коэффициент корреляции, показывающий зависимость между температурой пара и расходом топлива, а также зависимость между давлением пара и расходом топлива для парового котла № 1, при втором режиме составляет 0,2306 и 0,2352 соответственно.

Точки 1 и 3 иллюстрируют, что при большой разнице в давлении пара расход топлива изменился на малую величину $\Delta B = 0,00006$ кг/с. Малый перепад расхода топлива связан с резким возрастанием температуры питательной воды, $\Delta t = 8$ °С (2). Увеличение температуры питательной воды снизило потребность котла в большем расходе топлива для поддержания параметров пара (2).

$$B = \frac{D \cdot (h'' - h_{пв})}{Q_{н}^p \cdot \eta} \cdot 100, \quad (2)$$

где B – расход топлива, кг/с;

D – паропроизводительность, кг/с;

$h'', h_{пв}$ – энтальпия пара и питательной воды, МДж/кг;

$Q_{н}^p$ – низшая теплота сгорания топлива, МДж;

η – коэффициент полезного действия котла, %.

Таблица 3

Опытные значения работы двух паровых котлов при режиме № 2

Котел	Замер	Расход воды, кг/с	Температура воды, °С	Расход топлива, кг/с	Температура пара после котла, °С	Давление пара после котла, МПа
1	1	0,34278	45	0,01461	148	0,33
	2	0,34028	45	0,01449	156	0,43
	3	0,40194	53	0,01455	161	0,51
	4	0,35167	55	0,01487	160	0,49
2	1	0,38083	45	0,01983	152	0,36
	2	0,37167	45	0,01978	156	0,43
	3	0,33417	53	0,01988	160	0,49
	4	0,35611	55	0,01990	161	0,52

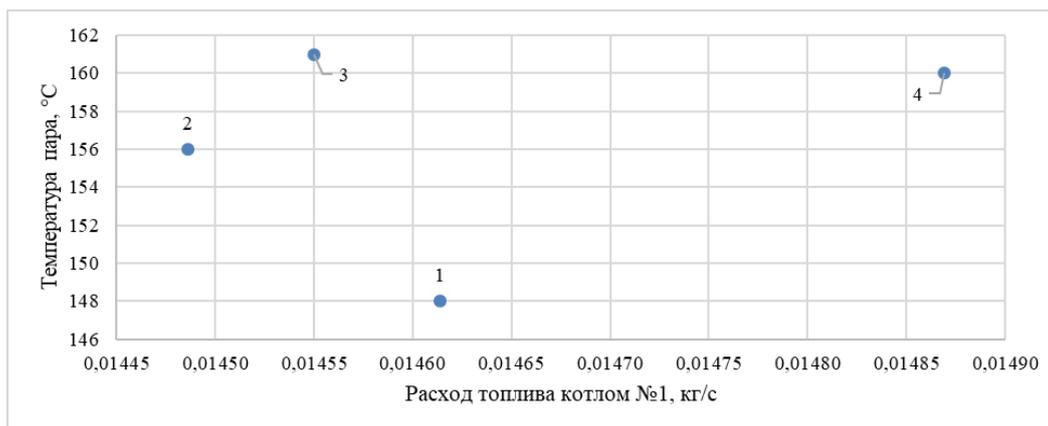


Рис. 8. Зависимость между температурой пара и расходом топлива на паровом котле № 1

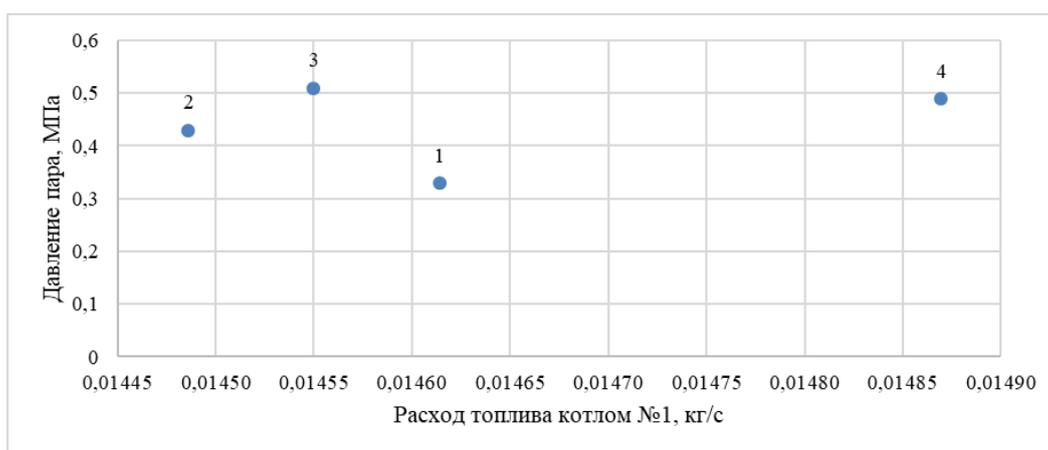


Рис. 9. Зависимость между давлением пара и расходом топлива на паровом котле № 1

Также видно из экспериментальных данных, что расход питательной воды в точке № 3 возрос, что повлекло резкий скачок всех параметров пара на выходе из котла. Вышеприведенные значения температуры и расхода питательной воды объясняют отклонение взаимосвязи между параметрами пара и расходом топлива в области точек 3 и 1.

На рис. 10 и 11 изображены зависимости между температурой, давлением пара и расходом топлива на первом котле соответственно.

Коэффициент корреляции, рассчитанный для изучения взаимосвязи между температурой, давлением пара и расходом топлива, на котле № 2 составил 0,6895 и 0,6888 соответственно. Эксперимент для второго котла проходил с плавным повышением всех параметров теплоносителя, поэтому прослеживается более сильная связь между температурой, давлением пара и расходом топлива.

Таким образом, анализ зависимостей параметров пара и расхода топлива показал, что малая аккумулирующая способность прямоточных котлов отражается на температуре и давлении пара при изменениях расхода топлива. В зави-

симости от эксплуатационных факторов поверхность нагрева пароперегревательной зоны меняется. Для поддержания неизменных параметров теплоносителя необходимо поддерживать соотношение расхода питательной воды и топлива [15, 20].

Значение расхода топлива является для прямоточного котла динамической характеристикой. В прямоточном котле отношение «вода – топливо» регулируется через температуру и количество питательной воды путем возврата конденсата и установки регулирующего крана. Изменение данной характеристики можно отразить через формулу расхода топлива (2). При малой аккумулирующей способности котла изменение расхода количества и температуры питательной воды влияют на величины D и $h'_{п.в.}$, что сказывается на мгновенном изменении значения расхода топлива V .

В режимно-наладочную карту записаны режимы № 3 (см. табл. 3) для первого и № 4 – второго котла. При данном режиме теплоноситель на выходе идет с максимальными параметрами по температуре и давлению при оптимальном расходе топлива для каждого котла.

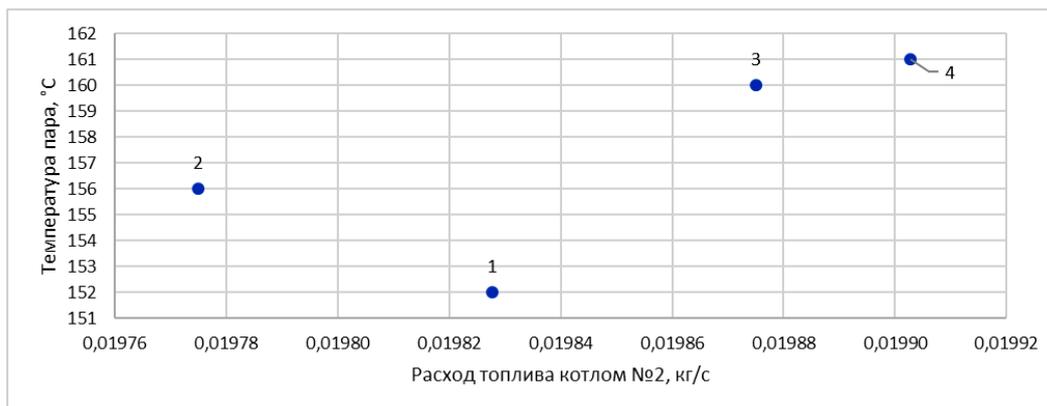


Рис. 10. Зависимость между температурой пара и расходом топлива на паровом котле № 2



Рис. 11. Зависимость между давлением пара и расходом топлива на паровом котле № 2

Технико-экономическая эффективность

В конструкции модели котла змеевикового типа отсутствует барабан. Процесс парообразования завершается в сепараторе, который установлен за пределами котла. Это положительно влияет на качество труб в течение работы: образование отложений не происходит в элементах котла в большом количестве за короткий срок, тем самым увеличивается срок эксплуатации и уменьшаются экономические затраты.

При внедрении новой котельной установки на буровую площадку эксплуатирующей компанией изучена тепловая схема всего производства и показатели теплоносителя в каждом блоке. В результате рассмотрения тепловой схемы подтвердилось наличие потерь теплоты в окружающую среду на линиях, отсутствие манометров и термометров, а соединение трубопроводов при возврате конденсата не обеспечивало должный объем теплоносителя, из-за чего возрастал расход подпиточной воды. На основании анализа полученной информации подтвердилась необходимость в модернизации тепловых линий. В совершенствование схемы входило изменение системы трубопроводов возврата конденсата в котельную с блоков, установка новых контрольно-измерительных приборов на линиях,

утепление трубопроводов и установка дополнительной утепленной емкости для сбора конденсата.

Теоретическая часть

Пространство, образованное цилиндрами змеевиков и стенкой внутреннего кожуха котла, служит для прохода топочных газов. Два цилиндрических кожуха котла образуют кольцевую камеру для прохода воздуха от вентилятора к горелочному устройству через отверстия, выполненные в основании котла [17]. Таким образом, в горелочное устройство подается подогретый воздух, что повышает конвективную составляющую лучисто-конвективного теплообмена в газоходах (3).

$$Q_{\text{фк}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \Delta T_{\text{гф}} \cdot F_1, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи от факела к стенке излучением, Вт/(м²·К);

$\Delta T_{\text{гф}}$ – разность температур (4), °С;

F_1 – площадь внутренней поверхности топки, м².

$$\Delta T_{\text{гф}} = T'_r - T_{\text{с1}}, \quad (4)$$

где T'_r – характерная температура газовоздушного потока (5), °С;

$T_{\text{с1}}$ – средняя температура стенки топки, °С.

$$T'_r = T_{\text{в}} + c_t \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{в}}), \quad (5)$$

где $T_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;

Зависимость коэффициента c_w от температур холодного и нагретого воздуха для парового котла змеевикового типа

	При наиболее холодной пятидневке, °С	При средней температуре наиболее холодного месяца, °С	При температуре воздуха $t = +8$ °С
$t_x, °С$	-40	-25	+8
$t_r, °С$	+27	+58	+65
c_w	1,029	1,026	1,032

c_t – температурная поправка [13];

T_r – температура газов, °С.

Результаты испытаний необходимо сопоставить с расчетными значениями. Обработка результатов эксперимента является причиной внесения изменений в технико-экономические показатели котла и практической оценки представленной конструкции змеевиков. При сопоставлении результатов опытных и расчетных, придерживаясь равенства исходных параметров (6), были введены поправочные коэффициенты. В основе равенства исходных параметров лежат потери q_2 , так как на данном параметре сказываются изменения в известных пределах исходных входных значений определяющих величин [16].

$$q_2^n = q_2 \pm \Delta q_2^{xb} \pm \Delta q_2^{пдг} \pm \sum k_r \Delta t, \quad (6)$$

где q_2 – потери тепла с уходящими газами, %;

Δq_2^{xb} – поправка на отклонение температуры холодного воздуха;

$\Delta q_2^{пдг}$ – изменение значений q_2 при подогреве воздуха в воздухоподогревателе на $\Delta T_{гф}$ (7).

$\sum k_r \Delta t$ – сумма произведений поправочных коэффициентов на отклонение исходного параметра на Δt , номинального или расчетного.

$$\Delta q_2^{пдг} = k_{пдг} \cdot (t_{пдг}^{рас} - t_{пдг}^{оп}), \quad (7)$$

где $t_{пдг}^{рас}$ – температура воздуха после воздухоподогревателя, расчетная, °С;

$t_{пдг}^{оп}$ – температура воздуха после воздухоподогревателя, опытное значение, °С.

$k_{пдг}$ – поправочный коэффициент.

$$\Delta q_2^{xb} = q_2 \cdot \frac{t_{xb}^{рас} - t_{xb}^{оп}}{\vartheta_{yx} - t_{xb}^{оп}}, \quad (8)$$

где $t_{xb}^{рас}$ – температура холодного воздуха, расчетная, °С;

$t_{xb}^{оп}$ – температура холодного воздуха, опытное значение, °С;

ϑ_{yx} – температура уходящих газов, °С.

Следовательно, методом сопоставления данных по температурам, рассчитанных по нормативному методу и полученных опытным путем, введен коэффициент c_w , обобщающий поправочные коэффициенты, используемые в отклонениях на температуру холодного воздуха и после воздухоподогревателя [16, 19].

Таким образом, уравнение (3) доработано по части введения поправочных коэффициентов на турбулизацию потока и на переменное значение

эквивалентного диаметра кольцевых каналов, образованных коаксиальными цилиндрическими поверхностями змеевиков (9) и на изменение температуры воздуха после воздухоподогревателя (10).

$$c_f = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{0,5}, \quad (9)$$

$$c_w = (1 + \Delta T^{(-0,5)})^{0,25}. \quad (10)$$

С учетом поправочных коэффициентов уравнение (3) преобразуется к виду (11):

$$Q_{фк} = c_f \cdot c_w \cdot \alpha_l \cdot \Delta T_{гф} \cdot F_1, \quad (11)$$

Опытные коэффициенты (9) и (10) получены впервые, использованы в тепловом расчете котла в формуле (11) с учетом нормативной методики [13, 14, 16].

На базе формул (3)–(11) получены зависимости коэффициента c_w от T_x и T_r для парового котла змеевикового типа (табл. 4). Данные табл. 4 могут использоваться при конструктивных и поверочных расчетах.

Выводы

Паровые котлы змеевикового типа в составе модернизированной котельной установки выдержали эксплуатацию на северном нефтяном месторождении «Варь-Ёган».

Результаты проведенного анализа собранных опытных данных в процессе экспериментальной эксплуатации МТКУ в реальных рабочих условиях позволяют сделать следующие частные выводы, представляющие интерес настоящего опытно-теоретического исследования:

1. Для уравнения конвективной составляющей лучисто-конвективного теплообмена в газоходах введены поправочные коэффициенты, с помощью которых $Q_{фк}$ приближено к реальному значению с учетом конструктивных особенностей котла. Представлены результаты зависимости поправочного коэффициента c_w от температуры наружного и нагретого воздуха.

2. В процессе опытной эксплуатации доказаны преимущества компактного исполнения котлов.

3. Опробование котельной установки показало, что стабильная температура топлива обеспечивала необходимую вязкость и хороший распыл топлива. Вместе с изменением расхода питательной воды и топлива происходило существенное изменение температуры и давления пара из-за ма-

лой аккумулирующей способности прямоточных котлов. Потери с недожогом и уходящим теплом уменьшились.

Литература

1. Bennett, G.J. *The Secret Life of Boilers: Dynamic Performance of Residential Gas Boiler Heating Systems - a Modelling and Empirical Study* / G.J. Bennett // *Conference: CIBSE Technical Symposium*. – 2019, Sheffield, UK. – April. – P. 25–26.
2. Bennett, G.J. *Space Heating Operation of Combination Boilers in the UK: the Case for Addressing Real-World Boiler Performance* / G.J. Bennett, C.A. Elwell, T. Oreszczyn // *Building Services Engineering Research and Technology*. – 2019. – No. 40.1. – P. 75–92. DOI: 10.1177/0143624418794552
3. *Domestic Demand-Side Response on District Heating Networks* / T. Sweetnam, C. Spataru, M. Barrett, E. Carter // *Building Research and Information*. – 2018. – P. 51–80. DOI: 10.1080/09613218.2018.1426314
4. *Central Heating Settings in Low Energy Social Housing in the United Kingdom* / A. Bruce-Konuah, R. Jones, A. Fuertes, P. Wilde // *Energy Procedia*. – 2019. – No. 158. – P. 3399–3404. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.941
5. Dixon, D. *An Empirical Oil, Steam, and Produced-Water Forecasting Model for Steam-Assisted Gravity Drainage with Linear Steam-Chamber Geometry* / D. Dixon, A. Nguyen // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. – 2019. – P. 253–268. DOI: 10.2118/195675-PA
6. Kusumastuti, I. *Effects of Various Steam Flooding Injection Patterns and Steam Quality to Recovery Factor* / I. Kusumastuti, T. Erfando, F. Hidayat // *Journal of Earth Energy Engineering*. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – P. 2909–2918. DOI: 10.25299/jeee.2019.vol8(1).2909
7. Badur, J. *Accelerated Start-Up of the Steam Turbine by Means of Controlled Cooling Steam Injection* / J. Badur, M. Bryk // *Energy*. – 2019. – No. 173. – P. 1242–1255. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.088.
8. Duarte, C.A. *Comparison of Calculated and Experimental Data Showed Their Satisfactory Compliance* / C.A. Duarte, E. Espejo, J.C. Martinez // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – Vol. 79. – P. 704–413. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.032
9. Завод паровых установок «UNISTEAM», г. Миасс. – <https://unisteam.com> (дата обращения: 01.07.2019).
10. Chauhan, S.S. *Energy Integration in Boiler Section of Thermal Power Plant* / S.S. Chauhan, S. Khanam // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 202. – P. 601–615. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.161
11. Shi, Y. *Ash Fouling Monitoring and Key Variables Analysis for Coal Fired Power Plant Boiler* / Y. Shi, J. Wang // *Thermal Science*. – 2015. – Vol. 19, no. 1. – P. 253–265. DOI: 10.2298/tsci120428118s
12. Лифшиц, О.В. *Справочник по водоподготовке котельных установок.* / О.В. Лифшиц. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.
13. Кузнецов, Н.В. *Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод.* / Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубровский; под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 296 с.
14. Лумми, А.П. *Расчет водогрейного котла* / А.П. Лумми, В.А. Муц. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – 41 с.
15. Сидельковский, Л.Н. *Котельные установки промышленных предприятий: учеб. для вузов по специальности «Промышленная теплоэнергетика»* / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев – 4-е изд., переп. – М.: БАСТЕТ, 2009. – 526 с.
16. Трёмбовля, В.И. *Теплотехнические испытания котельных установок.* / В.И. Трёмбовля В.И, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
17. Зыков, А.К. *Паровые и водогрейные котлы: справочное пособие* / А.К. Зыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: НПО ОБТ, 1995. – 119 с.
18. Липов, Ю.М. *Компоновка и тепловой расчет парового котла: учеб. пособие для вузов* / Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Виленский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
19. Пустыльник, Е.И. *Статистические методы анализа и обработки наблюдений.* – М.: Наука, 1968. – 288 с.
20. Пат. 2694890. *Российская Федерация. Электронагреватель жидкости.* / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, В.И. Богаткин, Е.В. Торопов, С.И. Кускарбекова; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ). – № 2018143417; заявл. 06.12.2018; опубл. 18.07.2019. – 8 с.

Дудкин Максим Михайлович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; dudkinmm@susu.ru.

Осинцев Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; osintsev2008@yandex.ru.

Кускарбекова Сулпан Ириковна, аспирант, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

Поступила в редакцию 6 июля 2019 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COIL TYPE STEAM GENERATOR PERFORMANCE WHEN USED IN NORTH OIL FIELDS

*M.M. Dudkin, dudkinmm@susu.ru,
K.V. Osintsev, osintsev2008@yandex.ru,
S.I. Kuskarbekova, sulpan.kuskarbekova@mail.ru*
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Transportable boiler plant, widespread in the Northern regions Russia, is used in various fields. The equipment currently in-use, as well as the existing boiler plants schemes have grown out of date and require either replacement, or modernization. The new plant features a coil type steam boiler and ancillary equipment, designed to mitigate the identified limitations. Steam boiler coils are coaxial cylinders. The modernized transportable boiler plant is installed and used in an oil field in the North.

The paper presents an experimental and theoretical research into the coil steam boiler actual performance. It also presents the boiler plant operation experimental data, the dependencies temperature and pressure of the coolant on the plant fuel consumption rate. The collected data has undergone statistical analysis. The authors present the conclusions, identifying the promising direction for further research and improvement of coil type steam boiler. The equations for the calculation of the convective component of radiant-convective heat transfer in flues are proposed. These equations account for the boiler unit design features, as new correction indices are introduced. When checked against the experimental data, the calculated data is proven to be satisfactory.

Keywords: boiler plant, tube coil, coaxial cylinders, heat transfer, convection.

References

1. Bennett G.J. The Secret Life of Boilers: Dynamic Performance of Residential Gas Boiler Heating Systems - a Modelling and Empirical Study. *Conference: CIBSE Technical Symposium 2019*, Sheffield, UK, April 25–26, 2019.
2. Bennett G.J., Elwell C.A., Oreszczyn T. Space Heating Operation of Combination Boilers in the UK: the Case for Addressing Real-World Boiler Performance. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2019, no. 40.1, pp. 75–92. DOI: 10.1177/0143624418794552
3. Sweetnam T., Spataru C., Barrett M., Carter E. Domestic Demand-Side Response on District Heating Networks. *Building Research and Information*, 2018, pp. 51–80. DOI: 10.1080/09613218.2018.1426314
4. Bruce-Konuah A., Jones R., Fuertes A., Wilde P. Central Heating Settings in Low Energy Social Housing in the United Kingdom. *Energy Procedia*, 2019, no. 158, pp. 3399–3404. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.941
5. Dixon D., Nguyen A. An Empirical Oil, Steam, and Produced-Water Forecasting Model for Steam-Assisted Gravity Drainage With Linear Steam-Chamber Geometry. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2019, pp. 253–268. DOI: 10.2118/195675-PA
6. Kusumastuti I., Erfando T., Hidayat F. Effects of Various Steam Flooding Injection Patterns and Steam Quality to Recovery Factor. *Journal of Earth Energy Engineering*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 2909–2918. DOI: 10.25299/jeee.2019.vol8(1).2909.
7. Badur J., Bryk M. Accelerated Start-Up of the Steam Turbine by Means of Controlled Cooling Steam Injection. *Energy*, 2019, no. 173, pp. 1242–1255. DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.088.
8. Duarte C.A., Espejo E., Martinez J.C. Comparison of Calculated and Experimental Data Showed Their Satisfactory Compliance. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 79, pp. 704–413. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.032
9. *Zavod parovykh ustanovok "UNISTEAM"*, Miass [Steam Generators Plant UNISTEAM]. Available at: <https://unisteam.com>.
10. Chauhan S.S., Khanam S. Energy Integration in Boiler Section of Thermal Power Plant. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 202, pp. 601–615. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.161
11. Shi Y., Wang J. Ash Fouling Monitoring and Key Variables Analysis for Coal Fired Power Plant Boiler. *Thermal Science*, 2015, vol.19, no. 1, pp. 253–265. DOI: 10.2298/tsci120428118s
12. Lifshits O.V. *Spravochnik po vodopodgotovke kotel'nykh ustanovok* [Handbook on Water Treatment of Boiler Plants]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 288 p.
13. Kuznetsov N.V. (Ed.), Mitor V.V. Dubrovskiy I.E. *Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov: normativnyy metod* [Thermal Calculation of Boiler Units: Standard Method]. Moscow, EKOLIT Publ., 2011. 296 p.
14. Lummi A.P., Munts V.A. *Raschet vodogreynogo kotla* [Calculation of Hot Water Boiler]. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU-UI Publ., 2009. 41 p.

15. Sidel'kovskiy L.N., Yurenev V.N. *Kotel'nye ustanovki promyshlennykh predpriyatiy* [Boiler Plants of Industrial Enterprises]. Moscow, BASTET Publ., 2009. 526 p.
16. Trembovlya V.I. *Teplotekhnicheskie ispytaniya kotel'nykh ustanovok* [Heat-Process Engineering Tests of Boiler Plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 416 p.
17. Zykov A.K. *Parovye i vodogreynye kotly: spravochnoe posobie* [Steam and Hot Water Boilers: Reference Manual]. Moscow, NPO OBT Publ., 1995. 119 p.
18. Lipov Y.M., Samoylov Y.F., Vilenskiy T.V. *Komponovka i teplovoy raschet parovogo kotla: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Layout and Thermal Calculation of the Steam Boiler: a Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 208 p.
19. Pustyl'nik E.I. *Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy* [Statistical Methods of Analysis and Processing of Observations]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 288 p.
20. Osintsev K.V., Osintsev V.V., Bogatkin V.I., Toropov E.V., Kuskarbekova S.I. *Elektronagrevatel' zhidkosti* [Electric Liquid Heater]. Patent RF, no. 2694890, 2019.

Received 6 July 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дудкин, М.М. Опытное исследование работы парового котла змеевикowego типа при эксплуатации на северном нефтяном месторождении / М.М. Дудкин, К.В. Осинцев, С.И. Кускарбекова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 14–25. DOI: 10.14529/power190402

FOR CITATION

Dudkin M.M., Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I. Experimental Investigation of Coil Type Steam Generator Performance when Used in North Oil Fields. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 14–25. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190402